ISSN 2223–2966

СОВРЕМЕННАЯ НАУКА:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

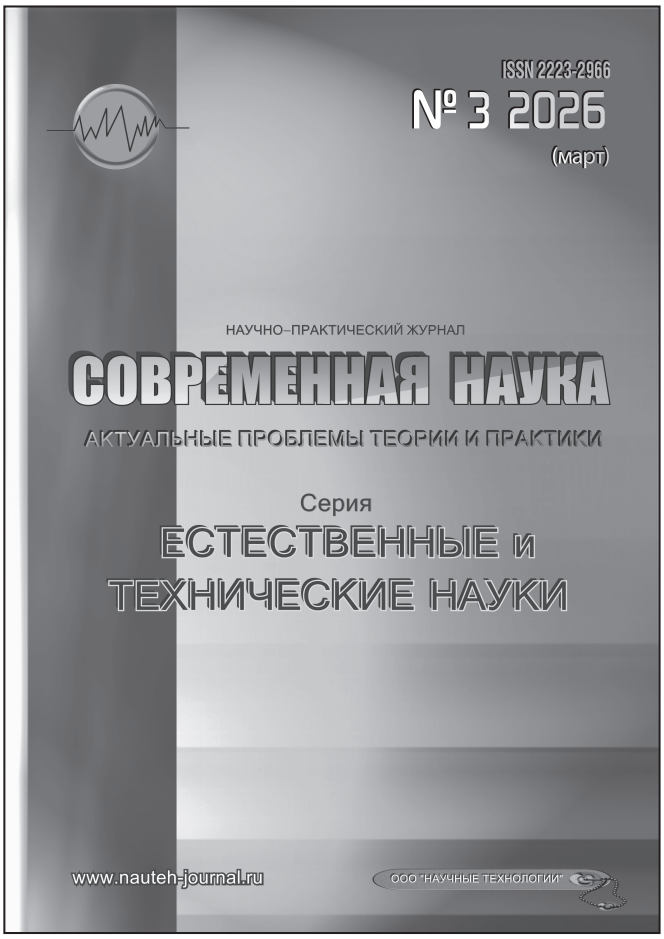
ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 3 2026 (МАРТ)

Научно-практический журнал

Scientific and practical journal

(ВАК — 1.1.2, 1.5.x, 2.3.x, 3.1.x)



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.

В НОМЕРЕ:

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

Издатель:
Общество с ограниченной ответственностью
«Научные технологии»

Адрес редакции и издателя:
109443, Москва, Волгоградский пр-т, 116-1-10
Тел/факс: 8(495) 142-8681

E-mail: redaktor@nauteh.ru
http: //www.nauteh-journal.ru

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

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

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

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

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

Подписано в печать 12.03.2026 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

К 100-летию со дня рождения известного советского учёного, профессора Дильмана Виктора Васильевича 8

Общая биология

Важов С.В., Черемисин А.А., Яськов М.И., Харченко Д.О., Важов В.М. — К изучению воробьинообразных птиц заказника «Егорьевский» (Алтайский край)
Vazhov S., Cheremisin A., Yaskov M., Kharchenko D., Vazhov V. — To study passerine birds of the Egor'evsky reserve (Altai territory) 10

Осинкина Т.В. — Экологические аспекты влияния полихлорированных бифенилов на активность ферментов череды трехраздельной (Bidens tripartita L.)
Osinkina T. — Environmental aspects of the influence of polychlorinated biphenyls on the enzyme activity of Bidens tripartita L. 14

Тюрин В.Г., Волчкова Л.А., Родионова Н.В., Бирюков К.Н. — Экологическая эффективность использования органических удобрений, полученных из побочных продуктов животноводства
Tyurin V., Volchkova L., Rodionova N., Biryukov K. — Ecological efficiency of the use of organic fertilizers obtained from animal 19

Информатика, вычислительная техника и управление

Азаб М.А.Э., Сила А.С., Коржук В.М. — Облегчённая самоконтролируемая ЭКГ-аутентификация для IoT-датчиков с ограниченными вычислительными ресурсами
Azab M.A., Sila A., Korzhuk V. — Lightweight self-supervised ECG authentication for resource constrained IoT edge sensors 24

Власов А.А. — Проектирование сложной технической системы с помощью модельной инженерии
Vlasov A. — Design of a complex production system using the model-based engineering approach 30

Горячкин Б.С., Андреев В.А., Семкин П.С. — Эргономический анализ временных характеристик формирования рекомендаций в системах обработки информации
Goryachkin B., Andreev V., Semkin P. — Ergonomic analysis of temporal characteristics of recommendation formation in information processing systems 37

Джалмухамбетова Е.А., Карташов М.В., Сячина Е.И., Тошпулотов А.А. — Математическое моделирование стохастических динамических систем в финансах на основе нейросетевых операторов и физически-информированного обучения: аналитический обзор
Dzhalmukhambetova E., Kartashov M., Syachina E., Toshpulotov A. — Mathematical modeling of stochastic dynamical systems in finance based on neural operators and physics-informed learning: an analytical review 46

Желенкова М.Б., Голдовский Я.М. — Байесовский сетевой подход к оценке рисков кибербезопасности внедрение и расширение модели FAIR
Zhelenkova M., Goldovsky Ya. — Bayesian network approach to cybersecurity risk assessment implementation and expansion of the fair model . . . 52

Журавлева М.О., Самохин М.Н. — Алгоритм оптимизации параметров ПИД-регулятора и его программная реализация на Python
Zhuravleva M., Samokhin M. — Algorithm for optimizing PID controller parameters and its Python software implementation 58

Забелина В.А., Горячкин Б.С. — Методы протокольной оптимизации веб-ресурсов: HTTP/2, HTTP/3 и глобальное распределение контента
Zabelina V., Goryachkin B. — Methods for protocol optimization of web resources: HTTP/2, HTTP/3, and global content distribution 70

Канталинский-Родин А.Е. — Методология и инструменты управления корпоративной архитектурой ООВО
Kantalinskiy-Rodin A. — Methodology and tools for university enterprise architecture management 79

Климин П.Ю. — Стеклянные модели для валютного рынка: архитектура и свойства аддитивных интерпретируемых моделей в автоматизированной торговле
Klimin P. — Glass boxes for the foreign exchange market: architecture and properties of additive interpreted models in automated trading 88

Комаров И.Д. — Эмбеддинги как основа автоматического индексирования научных текстов ключевыми терминами: алгоритмические ограничения и структурно-семантическая модель
Komarov I. — Embeddings as the basis for automatic indexing of scientific texts with key terms: algorithmic constraints and a structural and semantic model 94

Корендясев С.В., Ромашкова О.Н., Каптерев А.И. — Методы управления рисками при переработке радиационного вторичного сырья с учетом экологических ограничений
Korendyasev S., Romashkova O., Kapterev A. — Methods for managing risks in the processing of radiation secondary raw materials with consideration of environmental constraints 101

Короткий И.И. — Уязвимости процессов электронного документооборота в адвокатской деятельности: технические и юридические аспекты
Korotkiy I. — Vulnerabilities of electronic document management processes in advocacy: technical and legal aspects 106

Короткий И.И. — Безопасность цифровых коммуникаций адвоката: правовые и технические аспекты выбора надежных каналов связи
Korotkiy I. — Lawyer's digital communications security: legal and technical aspects of choosing reliable communication channels 111

Крез К.С., Шнейдеров Е.Н., Голушко В.И. — Система сравнения текстов: этапы предобработки и оценка оригинальности документов
Krez K., Shneiderov Y., Golushko V. — Text comparison system: preprocessing stages and document originality assessment 116

Курташ Н.С., Брютова С.Д., Молодяков С.А. — Применение алгоритмов градиентного бустинга для детекции финансового мошенничества
Kurtash N., Bryutova S., Molodyakov S. — Application of gradient boosting algorithms for detecting financial fraud 122

Морозов А.В., Булекбаев Д.А. — О бифуркациях периодических орбит в динамических системах на плоскости
Morozov A., Bulekbaev D. — On bifurcations of periodic orbits in dynamical systems on a plane..... 128

Мысаков Н.А., Асалиев И.А., Ромашкова О.Н., Добрынина Т.Н. — Целевая модель процесса управления утверждением административных документов в образовательной организации
Mysakov N., Asaliev I., Romashkova O., Dobrynina T. — A to-be model for administrative document approval process in an educational organization..... 133

Новиков Е.И., Афанасьев В.В., Кунин Н.Т. — Применение методики оценки критичности уязвимостей ФСТЭК России для анализа эффективности систем защиты информации в государственных информационных системах
Novikov E., Afanasyev V., Kunin N. — Application of the Russian federation's FSTEC vulnerability criticality assessment method to analyze the effectiveness of information security systems in government information systems..... 139

Новиков Е.И., Афанасьев В.В., Кунин Н.Т. — Формирование синтетических данных для обнаружения DDoS-атак с использованием машинного обучения
Novikov E., Afanasyev V., Kunin N. — Generation of synthetic data for detection of DDOS attacks using machine learning..... 144

Носов К.А., Санников Е.И. — Геймификационная образовательная среда как управляемая организационная система: модели и нотации управления устойчивостью образовательных процессов
Nosov K., Sannikov E. — A gamified educational environment as a managed organizational system: models and natations for managing the sustainability of educational process..... 151

Писарев А.К., Оганесян А.А., Ломакин А.С. — Проектирование метода коллекционирования информации о недвижимости за рубежом в условиях отсутствия шаблонизированных источников данных
Pisarev A., Oganesyan A., Lomakin A. — Design of a method for collecting information about real abroad in conditions of the absence of standardized data source 158

Полоников И.В. — Процессные ограничения роста EdTech-компаний: эмпирический анализ и интерпретация через призму зрелости бизнес-процессов
Polonikov I. — Process constraints on the growth of EdTech companies: an empirical analysis and interpretation through the lens of business process maturity..... 165

Раевская Н.А., Царегородцев А.В., Булекова Е.В., Усенко Е.А., Петрыкина А.Д. — Карты поведенческого профиля как инструмент проектирования системы UEBA
Raevskaya N., Tsaregorodtsev A., Bulekova E., Usenko E., Petrykina A. — Behavioral profile cards as a design tool for the UEBA system..... 171

Сеняткин Н.С. — Смещения в музыкальных рекомендательных системах: обзор, формализация, классификация и методы дебайсинга
Seniatkin N. — Biases in musical recommender systems: survey, formalization, classification and debiasing methods..... 178

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
Taran V. — Technical and functional analysis of the generative interrelations of the libraries-extensions «cell-aut.lsp» and «pianosyn.lsp — piano-note» of the nyquist programming language within the system of imitation modeling of algorithmic-combining audio signals using the cellular automata principle 184

Титов Д.А., Ромашкова О.Н. — Модель и алгоритмы QoS-маршрутизации потоков корпоративных данных в глобально распределённых облачных системах реального времени
Titov D., Romashkova O. — Model and algorithms for QoS-routing of corporate data flows in globally distributed real-time cloud systems 203

Тырышкин С.Ю., Игнатова Е.И., Парфенов П.Д. — Риск-ориентированные модели управления жизненным циклом доверенных систем искусственного интеллекта в критически значимых отраслях
Tyryshkin S., Ignatova E., Parfenov P. — Risk-based lifecycle management models for trusted artificial intelligence systems in critical sectors 209

Чесалов А.Ю. — Современный подход к построению предсказательных моделей на основе исторического опыта эксплуатации промышленного оборудования
Chesalov A. — A modern approach to building predictive models based on historical operating experience of industrial equipment 216

Клиническая медицина

Белова Е.В., Орлина М.А., Коган А.С., Муратова Т.Е. — Диагностика острого миелоидного лейкоза, нарушения регуляции микроРНК
Belova E., Orlina M., Kogan A., Muratova T. — Diagnosis of acute myeloid leukemia microRNA dysregulation 222

Ичмелян А.М., Богдасаров А.Ю., Давидян Л.Ю., Богдасарова Р.А. — Связь дефицита мелатонина и полиморфизма гена MTNR1B с исходами ЭКО у женщин с идиопатическим бесплодием
I*chmelyan A., Bogdasarov A., Davidyan L., Bogdasarova R.* — The association between melatonin deficiency and MTNR1B gene polymorphism with IVF outcomes in women with idiopathic infertility 226

Каткова А.В. — Интерактивный опрос и цифровая система поддержки принятия врачебных решений в предварительной дифференциальной диагностике заболеваний верхнего отдела желудочно-кишечного тракта

Katkova A. — Interactive questionnaire and digital clinical decision support system in preliminary differential diagnosis of diseases of the upper gastrointestinal tract 231

Коновалова М.В., Гайдуков С.Н., Курдынко Л.В., Прохорович Т.И., Джанибекова Ш.С. — Беременность и рак шейки матки — два клинических случая и обзор литературы
Konovalova M., Gaidukov S., Kurdynko L., Prokhorovich T., Dzhanibekova Sh. — Pregnancy and cervical cancer — a clinical case report and review of the literature. 236

Кулиева Г.З., Мкртчян Л.С., Кучеров В.В., Крикунова Л.И., Иванов С.А., Каприн А.Д. — Клинико-морфологические характеристики МРРШМ как факторы прогноза эффективности химиоэмболизации маточных артерий
Guliyeva G., Mkrtchyan L., Kucherov V., Krikunova L., Ivanov S., Kaprin A. — Clinical and morphological characteristics of locally advanced cervical cancer as predictors of the effectiveness of uterine artery chemoembolization 241

Лещева М.Ю., Коротких И.Н., Коричкина Л.Н., Поселюгина О.Б. — Оценка вегетативной и кардиореспираторной системы у женщин детородного возраста с воспалительными заболеваниями органов малого таза
Leshcheva M., Korotkih I., Korichkina L., Poselugina O. — Features of diagnosis of anemia syndrome in women with acute inflammatory diseases of the pelvic organs 249

Никифоров И.А., Чернобровкина Т.В., Костюк Г.П., Кондратюк М.Г., Бурыгина Л.А., Белова М.Ю., Кардашян Р.А., Игумнов С.А., Истомина В.В., Кочина А.О. — Факторы развития и биомаркеры нейровоспаления в постковидном синдроме (обзор литературы). Часть II
Nikiforov I., Chernobrovkina T., Kostyuk G., Kondratyuk M., Burygina L., Belova M., Kardashian R., Igumnov S., Istomina V., Kochina A. — Developmental factors and biomarkers of neuroinflammation in postcovoid syndrome (literature review). Part II ... 255

Петросян К.В., Хакимов Х.А., Дадабаев Г.М. — Оценка влияния интервенционного лечения артерио-венозных мальформаций легких на качество жизни пациентов используя современные шкалы-опросники
Petrosyan K., Khakimov Kh., Dadabaev G. — Evaluation of the endovascular treatment of pulmonary arteriovenous malformations on the quality of patient's life using modern questionnaire scales 264

Погосов Г.С., Ощепков В.Н., Рудаева Е.В., Ефетов В.С. — Современные представления о роли микробиоты кишечника при колоректальном раке
Pogosov G., Oshchepkov V., Rudaeva E., Efetov V. — Current ideas about the role of intestinal microbiota in colorectal cancer 270

Рожкова М.Г., Березкина Т.Н., Фищев С.Б., Севастьянов А.В., Павлова С.Г., Пуздырева М.Н., Шторина А.А., Орлова И.В. — Особенности ортопедического лечения пациентов с глубокой резцовой дизокклюзией и уменьшением высоты гнатической части лица: клинический случай
Rozhkova M., Berezkina T., Fischev S., Sevastyanov A., Pavlova S., Puzdyreva M., Shtorina A., Orlova I. — Features of orthopedic treatment of patients with deep incisor disocclusion and a decrease in the height of the gnathic part of the face: a clinical case 276

Рыбин Е.В., Обрезан А.Г. — Персонализированная оценка толерантности к физической нагрузке у пациентов с острым коронарным синдромом после эндоваскулярной реваскуляризации на стационарном этапе кардиореабилитации
Rybin E., Obrezan A. — Personalized assessment of exercise tolerance in patients with acute coronary syndrome after endovascular revascularization at the inpatient stage of cardiac rehabilitation 280

Савинков И.Ю. — Особенности течения комбинированных механо-термических поражений
Savinkov I. — Features of the course of combined mechanical and thermal lesions 285

Султанова О.Э., Чернышева Е.Н., Попов Е.А., Прокопенко Н.А., Печеров А.А., Касаткина С.Г., Султанова С.Ш. — Предикторы развития жизнеугрожающих осложнений (кардиогенного шока и отёка лёгких) у пациентов с острым коронарным синдромом на фоне синдрома недифференцированной дисплазии соединительной ткани

Sultanova O., Chernysheva E., Popov E., Prokopenko N., Pechorov A., Kasatkina S., Sultanova S. — Predictors of life-threatening complications (cardiogenic shock and pulmonary edema) in the acute period of myocardial infarction in patients with undifferentiated connective tissue dysplasia syndrome. 292

Третьякова И.Е. — Влияние аутологичных секреторных продуктов нейтрофилов (нейтрофилокинов) на бактериологическое состояние раны у больных с раневой хирургической инфекцией
Tretyakova I. — Influence of autologous secretory products of neutrophils (neutrophylokins) on the bacteriological state of the wound in patients with surgical wound infection 297

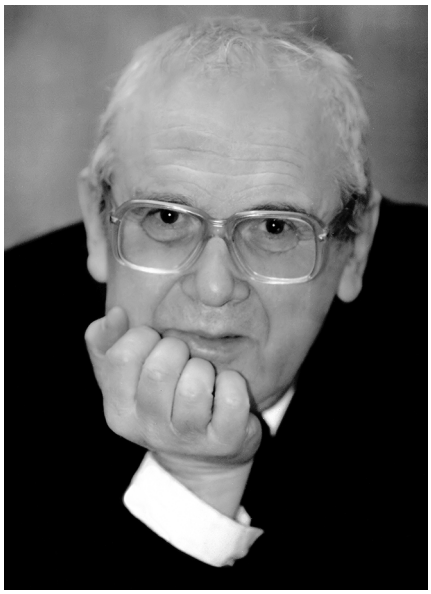
Турбин А.В., Пьянзина А.В., Немсцверидзе Я.Э., Полиданов М.А., Андрущенко А.А., Томашевский А.С. — Анализ и характеристика приборов для определения окклюзионной плоскости в клинике ортопедической стоматологии
Turbin A., Pyanzina A., Nemstsveridze Ya., Polidanov M., Andrushchenko A., Tomashevsky A. — Analysis and characterization of devices for determining the occlusal plane in the clinic of orthopedic dentistry 300

Турбин А.В., Пьянзина А.В., Немсцверидзе Я.Э., Полиданов М.А., Андрущенко А.А., Войтенок А.А. — Применение индивидуальной каппы для лечения острого пародонтита при подготовке больных к ортопедическому лечению
Turbin A., Pyanzina A., Nemstsveridze Ya., Polidanov M., Andrushchenko A., Voitenok A. — The use of an individual mouth guard for the treatment of acute periodontitis in the preparation of patients for orthopedic treatment 305

Шторина А.А., Березкина Т.Н., Фищев С.Б., Севастьянов А.В., Климов А.Г., Павлова С.Г., Пуздырева М.Н., Рожкова М.Г. — Исследование динамики атрофических изменений в тканях протезного ложа у пациентов с полной потерей зубов
Shtorina A., Berezkina T., Fischev S., Sevastyanov A., Klimov A., Pavlova S., Puzdyreva M., Rozhkova M. — A study of the dynamics of atrophic changes in the tissues of the denture bed in patients with complete loss of teeth 310

Наши авторы 316

К 100-летию со дня рождения известного советского учёного, профессора ДИЛЬМАНА Виктора Васильевича



Дильман Виктор Васильевич — яркая личность, хорошо известная в советском и российском научном мире.

Родился Виктор Васильевич в семье советской интеллигенции. Его мать — Дильман Татьяна Александровна советский химик-органик, первый директор Всесоюзного научно-исследовательского института синтетических и натуральных душистых веществ (ВНИИСНДВ), лауреат Сталинской премии. Отец — Дильман Василий Архипович, журналист и обозреватель газеты «Красная звезда». Брат — Дильман Сергей Васильевич видный советский инженер, старший научный сотрудник ВНИИКиМаш (ВНИИКриогенмаш). Двоюродный брат — Дильман Владимир Михайлович, доктор медицинских наук, профессор, знаменитый советско-американский эндокринолог и геронтолог, автор научного бестселлера «Большие биологические часы».

Дильман Виктор Васильевич принадлежит к тому поколению учёных, чей путь в науке начался в эпоху, когда фундаментальные исследования и промышленные задачи страны были неразрывно связаны. Его научные регалии говорят сами за себя — доктор технических наук, старший научный сотрудник (ВАК СССР), профессор, автор более 300 научных работ, обладатель различных государственных и ведомственных наград.

Виктор Васильевич — выпускник МИХМа (знаменитой 2-й спецгруппы1, кафедры «Механическое оборудование заводов турбокислородных установок» под руководством лауреата Нобелевской премии П.Л. Капицы). Его ранние работы, посвящённые изучению кинетики сложных химических процессов в условиях высоких температур и давлений, сразу обозначили область его главных интересов — превращение теоретических моделей в эффективные промышленные технологии. Виктор Васильевич создал методику расчёта гидравлического сопротивления тарелок, которая успешно используется при проектировании ректификационных колонн. Эти исследования проводились не в абстрактной лабораторной обстановке, а в тесном сотрудничестве с проектными институтами (ВНИИКиМаш, ВНИИХИМаш, ГИАП, ЦАГИ, НИФХИ им. Л.Я. Карпова) и опытными производствами, где каждый выведенный параметр имел конкретное практическое значение для страны. Период его становления как учёного совпал с интенсивным развитием новых направлений в химической технологии. Виктор Васильевич внёс неоценимый вклад в развитие процессов и аппаратов в области химической технологии и сосредоточил свои усилия на проблемах, связанных с оптимизацией энергоёмких процессов. Работы, вышедшие из-под его пера, последовательно раскрывали многогранную тему управления неравновесными системами (термодинамическое равновесие). Виктору Васильевичу принадлежат оригинальные научные идеи и математические описания, предназначенные для обработки физико-химических процессов в стационарных аппаратурных условиях. Там, где традиционные подходы оказывались недостаточными, он предлагал нестандартные инженерные решения, которые значительно повышали селективность и выход конечных целевых продуктов.

Научная карьера Виктора Васильевича Дильмана нашла логическое продолжение и в Институте общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова РАН, в коллективе выдающихся специалистов, где он возглавил исследования в области функциональных материалов и каталитических систем. Под его руководством были проведены циклы экспериментов, позволивших установить корреляции между структурой синтезированных соединений и их эксплуатационными характе-

[1] 2-я спецгруппа МИХМа (Московского института химического машиностроения) — особая (экспериментальная) спецгруппа целью которой являлось удовлетворение потребностей советского государства в высококвалифицированных специалистах для разработок и эксплуатации новых сверхэффективных кислородных установок. Всего было набрано две таких группы общей численностью 55 человек. Студенты этих групп обучались у ведущих учёных страны — А.А. Гухмана, М.П. Вукаловича, Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица по специальным учебным планам с упором на углублённое изучение криогеники с поощрением различных творческих инициатив. Курировал обучающихся П.Л. Капица — дважды Герой Социалистического Труда, Лауреат двух Сталинских премий, доктор физико-математических наук, профессор, академик АН СССР, Лауреат Нобелевской премии, член Лондонского королевского общества, иностранный член Национальной академии наук США.

ристиками в агрессивных средовых условиях. Полученные результаты легли в основу ряда патентов и технологических регламентов, внедренных в химической и нефтехимической отраслях.

Виктор Васильевич Дильман постоянно вёл активную научно-редакционную деятельность, состоял в редколлегиях профильных научных изданий, в частности долгое время являлся заместителем главного редактора академического журнала «Теоретические основы химической технологии». Особое место в его биографии занимает педагогическая и научно-организационная деятельность. Его педагогической колыбелью стал Московский физико-технический институт (МФТИ, Физтех), куда он попал по приглашению академика АН СССР Владимира Васильевича Струминского, который возглавлял кафедру механики гетерогенных сред. Семинары, лекции и консультации Виктора Васильевича Дильмана были известны своей конкретностью — вместо общих рассуждений он предпочитал детальный анализ экспериментальных данных и строгую проверку каждой гипотезы. Этот принцип он сохранил и в своей работе в качестве эксперта ряда научных советов и комиссий, где его мнение, основанное на глубоком знании предмета и инженерной практике, всегда имело особый вес. В преподавательской деятельности Виктор Васильевич не просто передавал знания ученикам — он формировал вокруг себя творческую среду, в которой молодые исследователи брались за сложные, а иногда и рискованные задачи. Виктор Васильевич подготовил пятерых кандидатов и несколько докторов наук.

Виктор Васильевич Дильман имеет звания ветерана труда и ветерана Великой Отечественной войны.

Редакция журнала «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» отдаёт дань уважения заслугам Виктора Васильевича Дильмана, которые имеют стратегическую важность для развития страны, ведь биография учёного, отдавшего столько лет отечественной науке — это не просто список достижений и публикаций. Это уникальная история последовательного движения от фундаментального знания к практическому его воплощению. Это история школы, которую он создал. Это история технологий, которые работают. Вклад Виктора Васильевича Дильмана в науку и экономическое развитие нашей страны невозможно переоценить, он измеряется не только академическими званиями, но и устойчивостью процессов, разработанных под его руководством, профессиональной состоятельностью его учеников, продолжающих развивать его направления в науке и промышленности.

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.03

К ИЗУЧЕНИЮ ВОРОБЬИНООБРАЗНЫХ ПТИЦ ЗАКАЗНИКА «ЕГОРЬЕВСКИЙ» (АЛТАЙСКИЙ КРАЙ)

TO STUDY PASSERINE BIRDS OF THE EGOR'EVSKY RESERVE (ALTAI TERRITORY)

S. Vazhov
A. Cheremisin
M. Yaskov
D. Kharchenko
V. Vazhov

Summary. The aim of this work is to summarize author-authored and published data on passerine birds and their habitats in the Yegoryevsky Nature Reserve and adjacent territory. The reserve is in the Altai Krai at the confluence of the Kasmalinsky and Barnaulsky pine forests. The scientific novelty and practical significance of this work lies in expanding the reserve's avifauna database, which should be used to improve biodiversity conservation measures in the region.

Keywords: Altai Territory, reserve, passerine birds, population, habitats.

Важов Сергей Викторович
кандидат биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО Алтайский государственный педагогический университет, г. Барнаул
Черемисин Алексей Александрович
кандидат географических наук, доцент, ФГБОУ ВО Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского, г. Норильск
Яськов Михаил Иванович
доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ФГБОУ ВО Горно-Алтайский государственный университет
Харченко Дарья Олеговна
ФГБОУ ВО Алтайский государственный педагогический университет, г. Барнаул
Важов Виктор Маркович
доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ФГБОУ ВО Алтайский государственный педагогический университет, г. Барнаул
vazhov49@mail.ru

Аннотация. Цель работы — обобщение авторских и литературных сведений о воробьинообразных птицах и их местообитаниях в Егорьевском заказнике и на сопредельной территории. Заказник расположен в Алтайском крае в месте объединения лент Касмалинского и Барнаульского боров. Научная новизна и практическая значимость работы состоит в пополнении банка данных об авифауне заказника, что необходимо использовать в совершенствовании мероприятий по охране биоразнообразия в регионе.

Ключевые слова: Алтайский край, заказник, воробьинообразные птицы, население, местообитания.

Введение

Егорьевский заказник создан в месте объединения лент Касмалинского и Барнаульского боров в Егорьевском районе Алтайского края (рис. 1). В крае он играет важную роль в сохранении и воспроизводстве авифауны, в частности, воробьинообразных птиц, а также в охране мест их естественного обитания. Территория Егорьевского заказника составляет 20 тыс. га и относится к Ключевым Орнитологическим Территориям России [1, 2].

Население птиц зависит не только от природных факторов, но и во многом от воздействия человека на окружающую природную среду. Негативное влияние на места обитания птиц в значительной степени определяют распространение представителей авифауны, благополучие которой свидетельствует о естественном функционировании экологических систем [3].



Рис. 1. Карта-схема Егорьевского заказника [2]

Фаунистическая особенность региона в основном формируется местонахождением, территориальными и климатическими показателями, а также биоразнообразием и потребностями животных к среде обитания [4].

Территория заказника относится к Кулундинской низменности. Рельеф заказника в основном бугристо-грядовый и грядово-ложбинный. Для территории заказника обычны водно-болотные угодья [1].

Для Касмалинского и Барнаульского ленточных боров, включая заказник «Егорьевский», свойственно большое разнообразие населения воробьинообразных птиц, которое остаётся недостаточно изученным. Поэтому исследование данных представителей авифауны в заказнике в целях совершенствования природоохранных мер является актуальным.

Цель исследования — обобщение авторских и литературных сведений о воробьинообразных птицах и их местообитаниях в Егорьевском заказнике и на сопредельной территории.

Материал и методы

Основой для сообщения послужили данные полевых экспедиций в заказнике «Егорьевский» и на сопредельной территории в весенне-летние периоды 2011–2025 гг. В работе использовалась стандартная методика маршрутного учёта с неограниченной полосой наблюдения [5, 6, 7]. Названия видов, расположение систематических групп приведено в соответствии с общепринятыми справочниками и определителями [8, 9].

Результаты и обсуждение

Местообитания птиц в заказнике и на сопредельной территории связаны с лесохозяйственными и водно-болотными угодьями, их трансформация в значительной степени определяет население и распространение представителей авифауны [10, 11, 12]. В результате проделанной работы учтены 40 видов птиц, среди которых в Красную книгу Алтайского края (2016) внесены 2 вида: чернолобый (*Lanius minor*) и серый (*Lanius excubitor*) сорокопуты [13].

Ниже приводится список учтённых видов с указанием местообитаний в заказнике.

Отряд Воробьинообразные — Passeriformes

Семейство Трясогузковые — Motacillidae

1. Лесной конёк *Anthus trivialis*. Характерен для сосновых и смешанных лесов.
2. Жёлтая трясогузка *Motacilla flava*. Обитает по открытым луговинам и заболоченным местам.
3. Желтоголовая трясогузка *Motacilla citreola*. Встречается во влажных местах, заросших не густой древесно-кустарниковой растительностью.
4. Белая трясогузка *Motacilla alba*. Населяет береговую часть озёр, пойменные участки водотоков.

Семейство Сорокопутовые — Laniidae

5. Обыкновенный жулан *Lanius collurio*. Характерен для открытых мест среди древесно-кустарниковой растительности.
6. Чернолобый сорокопут *Lanius minor*. Редкий вид [13]. Предпочитает лесные опушки и поляны
7. Серый сорокопут *Lanius excubitor*. Редкий вид [13]. Наблюдается в древесно-кустарниковой растительности, перемежающейся с открытой местностью

Семейство Иволговые — Oriolidae

8. Обыкновенная иволга *Oriolus oriolus*. Встречается преимущественно в лиственных лесах.

Семейство Скворцовые — Sturnidae

9. Обыкновенный скворец *Sturnus vulgaris*. Типичный обитатель старовозрастных лесов, лишенных подлеска.

Семейство Врановые — Corvidae

10. Сойка *Garrulus glandarius*. В своем распространении связана со смешанными лесами, имеющими дуплистый древостой и богатую лесную подстилку.
11. Сорока *Pica pica*. Встречается на открытой местности среди деревьев и кустарников.
12. Серая ворона *Corvus (corone) cornix*. Обитает по лесным окраинам.
13. Ворон *Corvus corax*. Наблюдается в лесу и на его открытых участках.

Семейство Сверчковые — Grylloidea

14. Обыкновенный сверчок *Locustella naevia*. Выбирает открытые сырые места среди кустарника, увлажнённые опушки леса, ивняково-тростниковые заросли по берегам озёр.

Семейство Славковые — Sylviidae

15. Садовая камышевка *Acrocephalus dumetorum*. Населяет кустарник, высокотравье во влажных местах, лесные опушки.
16. Серая славка *Sylvia communis*. Встречается в кустарниковых зарослях.
17. Славка-мельничек *Sylvia curruca*. Обитает в лесных и кустарниковых зарослях у водоёмов и водотоков.
18. Зелёная пеночка *Phylloscopus trochiloides*. Встречи характерны для разреженных лесных участков с разным подлеском и травами, для опушек леса.

Семейство Камышковые — Acrocephalidae

19. Зелёная пересмешка *Hippolais icterina*. Предпочитает редкий лиственный древостой с развитым кустарниковым ярусом в увлажнённой местности.

Семейство Мухоловковые — Muscicapidae

20. Серая мухоловка *Muscicapa striata*. Распространена в лесном редколесье и на его опушках.
21. Обыкновенная горихвостка *Phoenicurus phoenicurus*. Наблюдается на открытых участках леса с низкой растительностью.
22. Обыкновенный соловей *Luscinia luscinia*. Выбирает кустарники увлажнённых мест.
23. Варакушка *Luscinia svecica*. Характерна для тростниковых займищ.

Семейство Дроздовые — Turdidae

24. Рябинник *Turdus pilaris*. Населяет открытые пространства смешанного и лиственного леса с большим количеством ягодных кустарников.
25. Белобровик *Turdus iliacus*. Встречается в травяных сосновых и смешанных лесах с развитым подлеском.

Семейство Длиннохвостые синицы — Aegithalidae

26. Ополовник *Aegithalos caudatus*. Распространён на опушках и вблизи разнообразных лесов.

Семейство — Ремезовые

27. Обыкновенный ремез *Remiz pendulinus*. Обитатель береговых и других лиственных лесов.

Семейство Синицевые — Paridae

28. Пухляк *Parus montanus*. Наблюдается в сырых или заболоченных сосняках и смешанных лесах.
29. Князёк *Parus cyanus*. Выбирает кустарник, как правило, увлажнённых мест.
30. Большая синица *Parus major*. Населяет старые смешанные и лиственные леса с древостоем, имеющим дуплистые деревья для устройства гнёзд.

Семейство Воробьиные — Passeridae

31. Полевой воробей *Passer montanus*. Обитает по открытым луговинам, заболоченным местам.

Семейство Поползневые — Sittidae

32. Обыкновенный поползень *Sitta europaea*. Обычен в сосновых и смешанных лесах.

Семейство Вьюрковые — Fringillidae

33. Щегол *Carduelis carduelis*. Встречается на открытых участках редколесья, в кустарниках и зарослях трав.
34. Обыкновенная чечевица *Carpodacus erythrinus*. Характерна для лесных кустарников.
35. 35. Урагус *Uragus sibiricus*. В распространении связан с кустарниками увлажнённых угодий.
36. Обыкновенный снегирь *Pyrrhula pyrrhula*. Наблюдается в лесах, имеющих густой подлесок.
37. Обыкновенный дубонос *Coccothraustes coccothraustes*. Характерен для лиственных и смешанных лесов.

Семейство Овсянковые — Emberizidae

38. Обыкновенная овсянка *Emberiza citrinella*. Обычна в разреженной древесной и кустарниковой растительности.
39. Камышовая овсянка *Schoeniclus schoeniclus*. Населяет заросли в береговой части озёр.
40. Дубровник *Ocyris aureolus*. Обитает по открытым луговинам и заболоченным местам.

Заключение

Фаунистические наблюдения показали, что в годы исследований в пределах Егорьевского заказника и на сопредельной территории в местах естественного обитания зарегистрировано 40 видов воробьинообразных птиц из 17 семейств. Наиболее богато видами семейство Вьюрковые. Зарегистрировано пребывание 2 редких видов птиц. Использование современных сведений о фауне и местообитаниях представителей воробьинообразных в Егорьевском заказнике необходимо использовать для совершенствования природоохранных мер.

Благодарность. *Авторы выражают благодарность государственному инспектору КГБУ «Алтайприрода» Александру Викторовичу Туеву и директору Титовской школы Андрею Анатольевичу Чухлову оказавшим помощь в проведении полевых исследований в Егорьевском заказнике.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Егорьевский заказник [Электронный ресурс] URL: https://minprirody-old.alregn.ru/directions/prirodnye_resursy/oopt/zakazniki/egorevskij_zakaznik/_(дата обращения: 02.10.2025). Заглавие с экрана.
2. Заказник Егорьевский / составители: И.А. Хрусталева, В.Ю. Петров, А.Н. Куприянов // Красная книга Алтайского края. Особо охраняемые природные территории. Барнаул, 2009. С. 46–49.
3. Демидович А.П., Никулина Н.А., Никулин А.А. Особенности видового разнообразия представителей класса Aves L. 1758 в окрестностях п. Нижний Кочергат // Научно-практический журнал «Вестник ИрГСХА». 2021. Вып. 5 (106). С. 95–104. DOI: 10.51215/1999–3765-2021-106-95-104.
4. Каюкова С.Н., Никулина Н.А. Забайкальский край как область обитания охотничьих животных // Научно-практически журнал "Вестник ИрГСХА". 2024. Вып. 3 (122). С. 103–113. DOI: 10.51215/1999-3765-2024-122-103-113.

5. Кузякин А.П. Зоогеография СССР // Учёные записки Московского педагогического университета им. Крупской. М., 1962. Т. 109. Вып. 1. С. 3–182.
6. Равкин Ю.С., Ливанов С.Г. Факторная зоогеография: принципы, методы и теоретические представления. Новосибирск: Наука, 2008. 205 с.
7. Bibby C.J., Jones M. & Marsden S. Expedition Field Techniques. Bird Surveys. London // Royal Geographical Society. 1998. P. 143.
8. Коблик Е.А., Редькин Я.А., Архипов В.Ю. Список птиц Российской Федерации. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. 256 с.
9. Рябицев В.К. Птицы Сибири. М. — Екатеринбург: Изд-во «Кабинетный ученый», 2014. Т. 1. 438 с.
10. Vazhov S.V., Matsyura A.V., Vazhov V.M. Fauna and population of passerine birds in the lower reaches of the Bolshaya Rechka River (Altai Territory, Bolsherechensky Reserve) // Acta Biologica Sibirica. 2023. Vol. 9. P. 71–84. https://doi.org/10.14258/abs.v9.e06.
11. Важов С.В., Важов В.М., Черемисин А.А., Яськов М.И., Харченко Д.О. Некоторые сведения о воробьинообразных птицах заказника «Мамонтовский» (Алтайский край) // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки». 2025. № 6/3. С. 7–10. DOI 10.37882/2223–2966.2025.06–3.05.
12. Важов С.В., Важов В.М., Ушакова Г.Г., Штехман А.И., Черданцева Е.В. К изучению летней фауны и населения птиц низовий реки Бии // Научно-практический журнал «Вестник ИрГСХА». 2023. № 2 (115). С. 59–72. DOI:10.51215/1999–3765-2023-115-59-71.
13. Красная книга Алтайского края. Т. 2. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды животных. 3-е изд., переработ. и доп. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2016. 312 с.

© Важов Сергей Викторович; Черемисин Алексей Александрович; Яськов Михаил Иванович;
Харченко Дарья Олеговна; Важов Виктор Маркович
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.29

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЛИЯНИЯ ПОЛИХЛОРИРОВАННЫХ БИФЕНИЛОВ НА АКТИВНОСТЬ ФЕРМЕНТОВ ЧЕРЕДЫ ТРЕХРАЗДЕЛЬНОЙ (BIDENS TRIPARTITA L)

Осинкина Татьяна Владимировна
кандидат биологических наук, доцент Оренбургского государственного медицинского университета
osinkina12@mail.ru

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF THE INFLUENCE OF POLYCHLORINATED BIPHENYLS ON THE ENZYME ACTIVITY OF BIDENS TRIPARTITA L

T. Osinkina

Summary. This article presents the results of an experimental study investigating the effects of polychlorinated biphenyls on the activity dynamics of certain oxidases in *Bidens tripartita* L. Superoxide dismutase and peroxidase activity were determined spectrophotometrically, and catalase activity was measured by permanganatometry. Polychlorinated biphenyls were used in the formulation of «Sovtol,» a mixture of 4-, 5-, and 6-chloro-substituted biphenyl derivatives. The activity of antioxidant enzymes, as factors of environmental adaptation, was determined during all stages of Bidens tripartita development: seedling, vegetation, and flowering. It was shown that, under the influence of polychlorinated biphenyls at a concentration of 0.001 mg/L, superoxide dismutase activity was highest at the seedling stage, exceeding the control by 3.6 times, and at the vegetation and flowering stages by 5.4 and 4.0 times, respectively. Primary exposure to toxicants at a concentration of 0.0005 mg/L had no significant effect on superoxide dismutase activity. The increase in superoxide dismutase activity at the seedling stage is possibly due to either the stabilizing effect of toxicants on the enzyme during initial exposure or to increased activity and production of enzyme forms more resistant to polychlorinated biphenyls, specifically during this period of plant development. Catalase and peroxidase activities exhibited similar dynamics at the seedling, vegetation, and flowering stages, showing a sharp increase following primary exposure to toxicants in a model experiment, demonstrating the phenomenon of a paradoxical dose-response relationship (hormesis). Bidens tripartita is a pharmacopoeial plant species. It is a source of biologically active compounds with a wide variety of chemical and pharmacological activities. A model experiment showed that the plant apparently forms ecological adaptations of biochemical parameters (antioxidant enzymes) to the action of polychlorinated biphenyls.

Keywords: ecological adaptations, bioindicators, toxicants, antioxidant enzymes, tripartite Bidens, polychlorinated biphenyls, superoxide dismutase, catalase, peroxidase, hormesis.

Аннотация. В статье отражены результаты эксперимента исследования влияния полихлорированных бифенилов на динамику активности некоторых оксидаз череды трехраздельной (*Bidens tripartita* L.). Активность супероксиддисмутазы и пероксидазы определяли спектрофотометрическим методом, активность каталазы методом перманганатометрии. Полихлорированные бифенилы использовались в составе «Совтол» — смесь 4, 5 и 6-хлорзамещенных производных бифенила. Активность антиоксидантных ферментов как факторов экологической адаптации определена во все фазы развития череды трехраздельной «проростки», «вегетация», «цветение». Показано, что под воздействием полихлорированных бифенилов в концентрации 0,001 мг/л активность супероксиддисмутазы оказалась максимальной на стадии «проростки», превысив контроль в 3,6 раза, на стадиях «вегетация» и «цветение» в 5,4 и 4,0 раза, соответственно. Первичное воздействии токсикантов в концентрации 0,0005 мг/л не оказало значительного влияния на активность супероксиддисмутазы. Рост активности супероксиддисмутазы на стадии проростков обусловлен, возможно, либо стабилизирующим действием токсикантов на фермент при первичном воздействии, либо ростом активности и продукции форм фермента более устойчивого к влиянию полихлорированных бифенилов, именно в данный период онтогенеза растения. Каталазная и пероксидазная активности проявили сходную динамику на этапах «проростки», «вегетация», «цветение», показав резкий рост при первичном воздействии токсикантов в модельном эксперименте, обозначив явление парадоксальной зависимости «доза-эффект» (гормезис). Череда трехраздельная — фармакопейный вид растений. Выступает источником многообразных по химической природе и фармакологической активности биологически активных соединений. В модельном эксперименте показано, что растение, по-видимому, формирует экологические адаптации биохимических параметров (антиоксидантных ферментов) к действию полихлорированных бифенилов.

Ключевые слова: экологические адаптации, биоиндикаторы, токсиканты, антиоксидантные ферменты, череда трехраздельная, полихлорированные бифенилы, супероксиддисмутаза, каталаза, пероксидаза, гормезис.

Введение

Экологические адаптации растений в силу их анатомо-морфологических (прикрепленный образ жизни) и биохимических особенностей (большое количество биологически активных соединений) являются приоритетными для оценки их состояния. Анализ метаболизма растений приобретает особую значимость, если речь идет о лекарственных растениях и видах-биоиндикаторах состояния среды обитания в условиях стресса, вызванного влиянием токсических веществ [1, с. 9]. Значительный интерес вызывает состояние лекарственных растений. Так как адаптационные способности данной группы определяют во многом синтез вторичных метаболитов. А именно вторичные метаболиты, как правило, обладают лекарственными свойствами.

Одним из основных адаптационных механизмов растений по причине их подверженности окислительному стрессу является работа систем антиоксидантной защиты. У растений система представлена специфическими для данной группы организмов оксидоредуктазами. В состав группы входят ферменты супероксиддисмутаза, каталаза, пероксидаза, глутатионредуктаза. По принципу действия супероксиддисмутаза выступает ферментом, реагирующим на наиболее агрессивный супероксид-анион радикал ($O2^{\bullet -}$) [7, с. 155]. Фермент катализирует его превращение в пероксид водорода и кислород. Пероксид водорода разрушается каталазой. Пероксидазная активность направлена на уничтожение уже образовавшихся в клетках растения перекисных соединений органической и неорганической природы [3, с. 163; 6, с. 29].

Среди стойких в окружающей среде (в том числе почве) органических загрязнителей следует учитывать полихлорированные бифенилы. Механизм действия их на фотосинтезирующие растения заключается в активации свободнорадикального окисления [9, с. 177]. Следствием подобного процесса является снижение активности антиоксидантных ферментов, способствующее угнетению жизнедеятельности растения и продукции биологически активных соединений [8, с. 123]. В связи с достаточной распространенностью полихлорированных бифенилов в почве и устойчивостью их в составе почвенных коллоидов [10, с. 672]. Актуальным является анализ действия соединений в ограниченные сроки действия и в ограниченном пространстве (в модельной экосистеме). На примере лекарственных растений, используемых в медицине и фармации.

Материалы и методы исследования

Материал исследования — вегетативные части череды трехраздельной (*Bidens tripartita* L.), семядольные проростки, побеги и листья, нераскрывшиеся и раскрывшиеся цветки растения. Выращивалось растение в контейнерах с почво-смесью для цветочных культур, а именно грунт «Универсальный» в течение 1,0–1,5 месяцев. С периодичностью (проростки, вегетация и цветение) растение подвергалось воздействию раствора «Совтол» (смесь полихлорированных бифенилов) в концентрациях 0,0005 мг/л, 0,001 мг/л, 0,0012 мг/л. Концентрации подобраны в соответствии с проведенными ранее исследованиями Н.В. Винокуровой (2013г.), установившей содержание полихлорированных бифенилов в почве на уровне данных значений. Полив производился однократно. От лишнего раствора поддон освобождался сразу же после полива, в остальные дни растения поливали по мере подсыхания земляного кома водопроводной, отстоявшейся водой. Контрольные образцы растений поливали водопроводной водой без минеральных и органических добавок.

Активность антиоксидантного фермента супероксиддисмутазы (СОД) определяли методом, основанном на способности ингибировать аутоокисление адреналина в адренохром (окрашенный) в щелочной среде (карбонатный буферный раствор pH=10,2). Процент ингибирования вычисляли по формуле:

$$A(\%) = \frac{(\text{Ек} - \text{Ео}) \times 100}{\text{Ек}} \quad (1)$$

Где А — активность фермента СОД, %;
Ек — экстинкция контроля;
Ео — экстинкция опыта.

Активность каталазы определяли методом перманганатометрии. Показатель рассчитывали по стандартной формуле:

$$A = \frac{(K - O) \times 0{,}85 \times E}{T} \quad (2)$$

K — количество $KMnO_4$, пошедшего на титрование в контроле, мл;
O — количество $KMnO_4$, пошедшего на титрование в опыте, мл:
0,85 — количество мл H_2O_2, соответствующее 1 мл 0,05н $KMnO_4$;
T — время инкубации (15 мин);
E — разведение [4, с. 72].

Метод определения активности фермента пероксидазы — фотоэлектроколориметрический основан на изменении времени, за которое опытный раствор достигнет определенной оптической плотности. В качестве субстрата использовался раствор 1 % бензидина.

Навеску растительного материала (65–110 мг) растирали в ступке с водой, переносили в мерную колбу на 50 мл и доводили дистиллированной водой до метки.

Растительную вытяжку настаивали в течение 20–25 мин, затем центрифугировали в течение 15–18 мин при 1500 об. /мин. Надосадочную жидкость (супернатант) использовали для определения активности фермента пероксидазы. Для определения активности брали две кварцевые кюветы толщиной около 1 см (оптический путь). По контрольной кювете устанавливали ноль прибора, предварительно заполнив ее 0,9 мл бензидина (1-й % раствор), 0,9 мл фильтрата и 1,6 мл воды. Во вторую опытную кювету вливали 0,9 мл бензидина, 0,9 мл фильтрата и 1,6 мл 0,3 %-ного раствора пероксида водорода, при этом сильная струя пероксида перемешивала содержимое кюветы. Добавление пероксида служило началом реакции. Одновременно с приливанием пероксида водорода включали секундомер. В опытной кювете раствор постепенно синел, стрелка прибора медленно перемещалась справа налево. Отмечали время, за которое стрелка достигнет 0,2 делений прибора (единицы оптической плотности). Активность фермента рассчитывали по следующей формуле:

$$A = \frac{Д \times E}{t \times d} \quad (3)$$

Д — оптическая плотность (0,1–0,2);

E — разведение (пересчет на 1 г сырой массы);

t — время, с;

d — толщина слоя жидкости, толщина кюветы (1 см) [4, с. 68].

Определения активности антиоксидантных ферментов производились в трех повторностях. Статистическую обработку результатов, полученных в ходе эксперимента, производили с использованием пакета MS Excel 2010 «Анализ данных» раздел «Описательная статистика» (Microsoft, USA).

Основные результаты и их обсуждение

Анализ данных по результатам модельного эксперимента показал: ферменты супероксиддисмутаза, каталаза и пероксидаза проявляли некоторую активность на всех стадиях вегетации. В отношении супероксиддисмутазы показано, что наибольшая активность в контроле отмечена на стадии «проростки» и «цветение». В «проростках» активность превышала в 1,34 раза остальные фазы роста. На стадии «вегетация» активность супероксиддисмутазы в череде трехраздельной на 59 % оказалась снижена по сравнению с «проростками» и «цветением».

Воздействие полихлорированных бифенилов (ПХБ) значительно повлияло на рост активности супероксидисмутазы только на стадии «проростков» при концентрации ПХБ 0,001 мг/л. Активность фермента возросла в 3,6 раза при сравнении с контролем; в 5,4 раза и 4,0 раза при «вегетации» и «цветении», соответственно (рис. 1).

Следовательно, проростки череды трехраздельной, по-видимому, содержат супероксиддисмутазу более чувствительную к повышенным концентрациям ПХБ в сравнении с формами фермента «работающими» в растении на этапе «вегетации» и «цветения» [2, с. 56].

В отношении каталазы череды отмечена иная тенденция динамики активности. В контроле значимых изменений не происходило — на этапах «проростки», «вегетация», «цветение» показатель незначительно варьировал в пределах 45,05–46,71 мл O_2/г×мин. В опыте даже при воздействии минимальных концентраций ПХБ — 0,0005 мг/л отмечен резкий скачок активности фермента в среднем в 2 раза на всех этапах анализа (рис. 2).

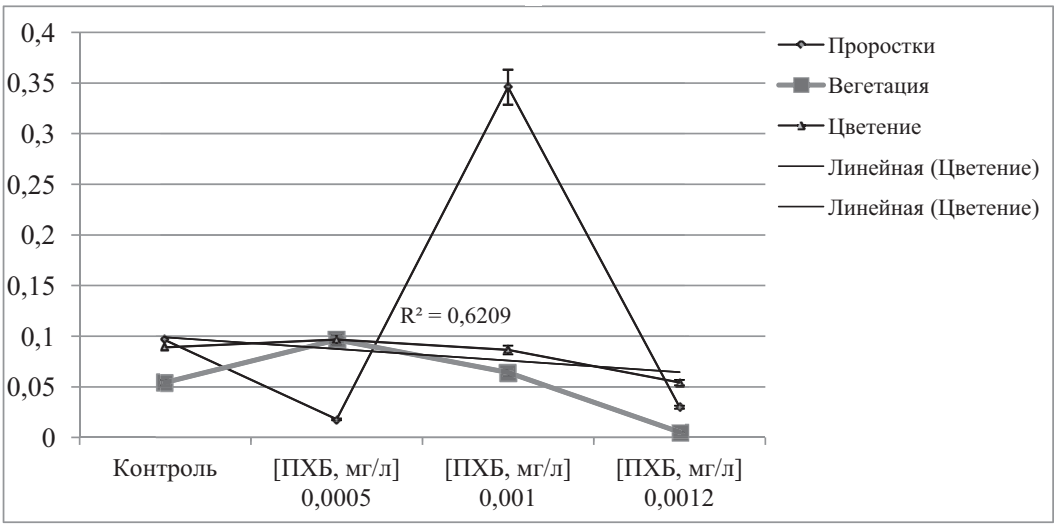


Рис. 1. Активность супероксиддисмутазы (СОД) (ед. А, %) череды трехраздельной (*Bidens tripartita* L) в разные периоды вегетации

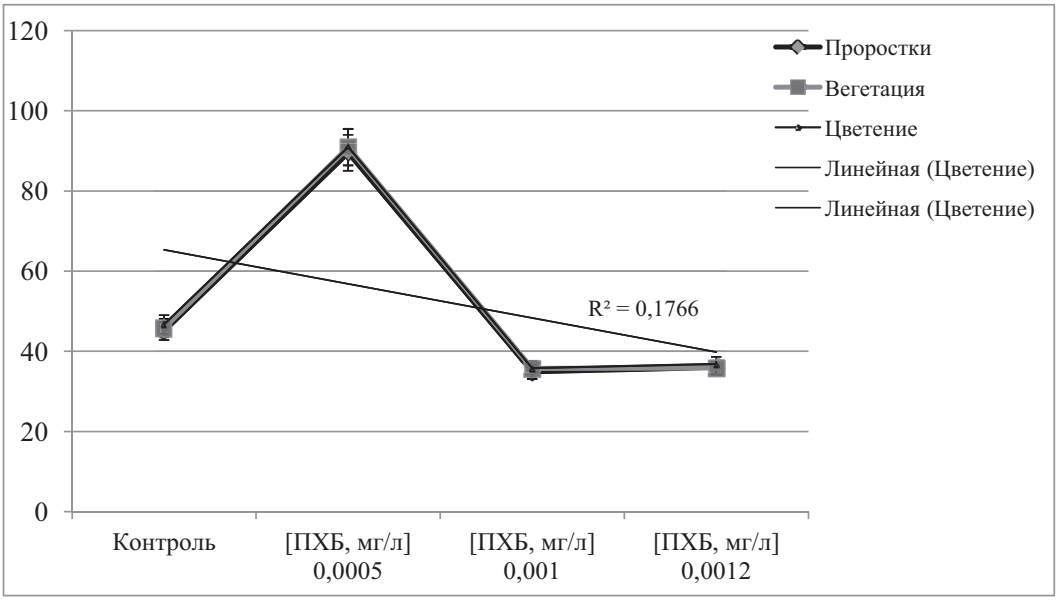


Рис. 2. Активность каталазы (мл O_2 / г×мин) череды трехраздельной (*Bidens tripartita* L) в разные периоды вегетации

Дальнейшее увеличение концентрации ПХБ до 0,001 и 0,0012 мг/л привело лишь к падению активности каталазы в среднем на 39 %. Подобная реакция растений на воздействия токсикантов может быть свидетельством проявления гормезиса или «парадоксальной зависимости «доза-эффект»». Данное явление зачастую возникает в ответ на первичное и кратковременное действие токсического вещества на организм. Реакция защитных систем организма на молекулярном уровне может быть обусловлена состоянием, возрастом, влиянием стрессовых факторов. «Острота» реакции антиоксидантных ферментов иллюстрирует, возможно, уровень стрессоустойчивости организма. Учитывая создание условий воздействия полихлорированных бифенилов, оказывающих даже в малых концентрациях ингибирующее действие на активные центры ферментов и конформацию белковой части (апофермента) [2, с.57; 5, с.38].

Каталаза в растении реагирует на pH среды и уровень закисления/защелачивания. Резкое кратковременное увеличение ее активности при наличии в среде ПХБ в концентрации 0,001 мг/л может быть следствием нарушения оптимума активности фермента (pH 7,1–7,2). С другой стороны — проникновение в клетку полихлорированных бифенилов могло спровоцировать рост концентраций субстратов (пероксид водорода H_2O_2). В ответ на данный процесс, по-видимому, усилился синтез защитного фермента, и, возможно, именно той его формы, которая способна ликвидировать перекисные соединения в экстремальных условиях.

Пероксидазная активность по характеру проявления оказалась схожа с активностью супероксиддисмутазы, однако ее максимум в этом случае обозначился уже при минимальном значении ПХБ (рис. 3).

Наибольшие показатели активности фиксировались только при воздействии ПХБ в концентрации 0,0005 мг/л. Для «проростков» и «вегетации» в 4,9 раза и в 5,5 раза больше чем в контроле, соответственно. Достаточно высокая активность фермента отмечена для периода «цветения» и составила 0,0063 ΔD_{670}/г×с в сравнении с другими этапами и контролем. Подобный характер динамики активности отмечен и в случае каталазы, что свидетельствует, по-видимому, о возможности явления парадоксальной зависимости «доза-эффект» для данных ферментов. Острая реакция организма растения, проявившаяся в росте активности защитных оксидаз, в данном случае может быть формированием биохимической экологической адаптации череды трехраздельной к стрессовым факторам среды обитания (полихлорированным бифенилам в почве). Учитывая факт того, что активные центры выше указанных оксидаз содержат ионы Fe^{2+} (каталаза) и Cu^{2+} (супероксиддисмутаза) следует предположить химическую «атаку» и последующую блокировку металл-зависимых оксидаз. Особо химически активными считаются планарные конгенеры с 4, 5 и 6 подвижными атомами хлора в составе конденсированных бифенилов.

Заключение

Таким образом, полученные данные позволяют сделать следующие выводы:

1) Активность антиоксидантных ферментов как факторов экологической адаптации определена во все фазы развития череды трехраздельной «проростки», «вегетация». «цветение»;
2) Показано, что под воздействием полихлорированных бифенилов в концентрации 0,001 мг/л активность супероксиддисмутазы оказалась максимальной на стадии «проростки», превысив кон-

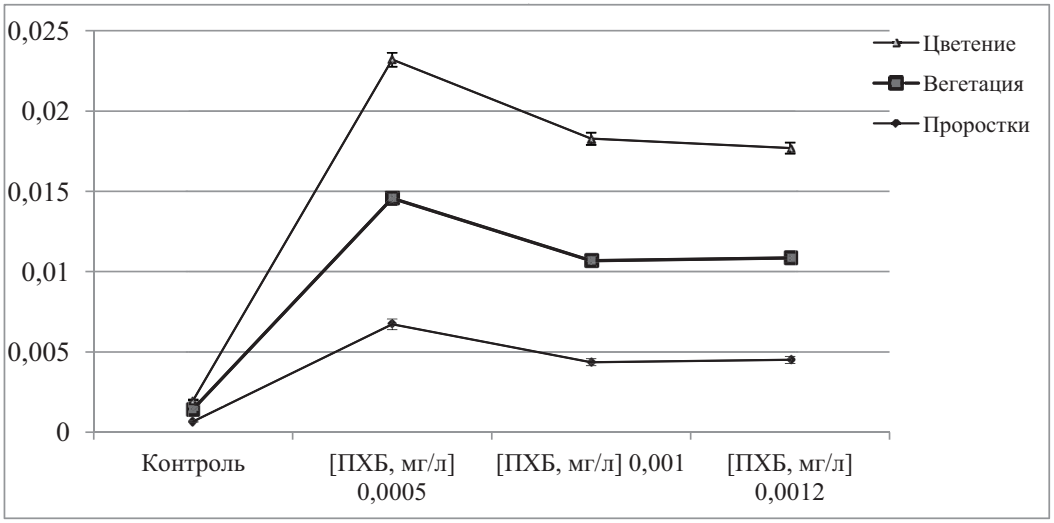


Рис. 3. Активность пероксидазы (ΔD_{670}/г×с) череды трехраздельной (*Bidens tripartita* L) в разные периоды вегетации

троль в 3,6 раза, на стадиях «вегетация» и «цветение» в 5,4 и 4,0 раза, соответственно;

3) Рост активности супероксиддисмутазы на стадии проростков обусловлен, возможно, либо стабилизирующим действием токсикантов на фермент, либо ростом продукции форм фермента более устойчивого к влиянию полихлорированных бифенилов;
4) Каталазная и пероксидазная активности проявили сходную динамику, показав резкий рост при первичном воздействии токсикантов в модельном эксперименте, показав явление парадоксальной зависимости «доза-эффект»;
5) Череда трехраздельная — фармакопейный вид растений, выступающий источником биологически активных соединений. В модельном эксперименте показано, что растение, по-видимому, формирует экологические адаптации биохимических параметров (антиоксидантных ферментов) к действию полихлорированных бифенилов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авальбаев А.М. Влияние модельной засухи на физиолого-биохимические параметры разных экотипов пшеницы на начальном этапе онтогенеза / А.М. Авальбаев, Р.А. Юлдашев, А.Р. Лубянова, А.А. Плотников, А.И. Якупова, Н.А. Герасимов, Ч.Р. Аллагулова // Таврический вестник аграрной науки. — 2023. — № 3 (35) — С. 8–22.
2. Балакина А.А. Влияние регуляторов роста на изоферментный состав супероксиддисмутазы в растениях люпина узколистного (Lupinus angustifolius L.) in vitro / А.А. Балакина, А.А. Терентьев, Е.А. Калашникова, С.Л. Белопухов // Бутлеровские сообщения. — 2012. — № 1–3. — т. 29. — С. 55–60.
3. Безрукова М.В. Влияние 24-эпибрассинолида на водный обмен отличающихся по засухоустойчивости сортов пшеницы при осмотическом стрессе / М.В. Безрукова, Г.Р. Кудоярова, А.Р. Лубянова, Д.Р. Масленникова, Ф.М. Шакирова / Физиология растений. — 2021. — Т. 68. — № 2. — С. 161–169. DOI; 10/31857/S0015330321010048.
4. Воскресенская О.Л. Большой практикум по биоэкологии: уч. пособ. / ГОУ ВПО Марийский государственный университет / О.Л. Воскресенская, Е.А. Алябишева, М.Г. Половникова. — Йошкар-Ола. — 2006. — 107 с.
5. Мишко А.Е. Динамика активности пероксидазы и ее изоформ в листьях разных сортов яблони / А.Е. Мишко, Е.О. Луцкий // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. — 2021. — 182(3). — С. 37–43.
6. Рахматуллина Н.Ш. Показатели антиоксидантной системы Artemisia annua L., Matricaria chamomilla L. и Tanacetum vulgare L. в естественных условиях произрастания и в городской среде / Н.Ш. Раматуллина, Н.Г. Акиншина, А.А. Азизов, Г.Г. Раджабова // Научное обозрение. — 2020. — № 4. — С.28–32.
7. Сидякин А.И. Активность каталазы и пероксидазы пшеницы и томатов при инокуляции trihoderma sp. на ранних этапах онтогенеза / А.И. Сидякин, С.И. Чмелева, В.В. Белоусов, Э.Р. Джелдубаева, К.Н. Туманянц // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. — 2025. — № 1. — Т 11(77). — С. 151–161.
8. Guizani A. Drought responsiveness in six wheat genotypes: identification of stress resistance indicators / A. Guizani, H. Askri, M.L. Amenta, R Defez, E. Babay, C. Bianco, N. Rapana, M. Finetti-Sialer, F. Gharbi // Frontiers in Plant Science. — 2023. — Vol. 14. — Art. — No. 1232583. DOI: 10.3389/fpls.2023.1232583.
9. Hura T. Drought-stress induced physiological and molecular changes in plants 2.0 / T. Hura, K. Hura, A. Ostrowska // International Journal of Molecular Sciences. — 2023. — Vol. 24. — Art. — No. 1773. DOI: 10.3390/ijms24021773.
10. Razi K. Drought stress-induced physiological mechanisms, signaling pathways and molecular response of chloroplasts in common vegetable crops / K. Razi, S. Muneer // Critical Reviews in Biotechnology. — 2021. — Vol. 41. — P. 669–691. DOI: 10.1080/07388551.2021.1874280.

© Осинкина Татьяна Владимировна (osinkina12@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.46

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ЖИВОТНОВОДСТВА

ECOLOGICAL EFFICIENCY OF THE USE OF ORGANIC FERTILIZERS OBTAINED FROM ANIMAL

V. Tyurin
L. Volchkova
N. Rodionova
K. Biryukov

Summary. The article examines the ecological effectiveness of the use of organic fertilizers produced from animal by-products in organic farming systems. The relevance of the study is due to the need to reduce anthropogenic pressure on agroecosystems and the transition to a closed-loop resource use model in the agricultural sector. Modern technologies for processing manure and manure into organic fertilizers, their effect on the agrochemical properties of the soil, crop productivity and greenhouse gas emissions are analyzed. It has been shown that the use of organic fertilizers of animal origin can reduce the leaching of nutrients, reduce greenhouse gas emissions compared with mineral analogues and increase the content of organic carbon in the soil. It has been revealed that maximum environmental efficiency is achieved with the combined use of organic fertilizers with biologics and biochar, which provides a synergistic effect in improving soil fertility. The main problems of implementing these technologies have been identified, including the instability of fertilizer composition, logistical constraints, and the need to adapt to specific soil and climatic conditions. Ways to solve the problems and prospects of using organic fertilizers of animal origin in organic farming are considered, including the introduction of digital platforms for calibration of nutritional properties, integrated use with microbiological preparations and biochar, the development of technologies for anaerobic digestion and pyrolysis.

Keywords: organic fertilizers, by-products of animal husbandry, organic farming, closed-loop economy, environmental efficiency.

Тюрин Владимир Григорьевич
Доктор ветеринарных наук, профессор, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии — МВА имени К.И. Скрябина
potyemkina@mail.ru
Волчкова Лалита Анзориевна
Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии — МВА имени К.И. Скрябина
lolita_volchkova@mail.ru
Родионова Наталья Владимировна
Кандидат биологических наук, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии — МВА имени К.И. Скрябина
rodionovanatasha@bk.ru
Бирюков Кирилл Николаевич
Кандидат ветеринарных наук, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии — МВА имени К.И. Скрябина
19kirill85@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается экологическая эффективность применения органических удобрений, произведённых из побочных продуктов животноводства, в системах органического земледелия. Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения антропогенной нагрузки на агроэкосистемы и переходом к модели использования ресурсов в виде замкнутого цикла в аграрном секторе. Проанализированы современные технологии переработки навоза и помёта в органоминеральные удобрения, их влияние на агрохимические свойства почвы, продуктивность сельскохозяйственных культур и эмиссию парниковых газов. Показано, что использование органических удобрений животного происхождения позволяет снизить выщелачивание питательных веществ, сократить выбросы парниковых газов по сравнению с минеральными аналогами и повысить содержание органического углерода в почве. Выявлено, что максимальная экологическая эффективность достигается при комплексном применении органических удобрений с биопрепаратами и биоуглём, что обеспечивает синергетический эффект в улучшении почвенного плодородия. Определены основные проблемы внедрения данных технологий, включая нестабильность состава удобрений, логистические ограничения и необходимость адаптации к конкретным почвенно-климатическим условиям. Рассмотрены пути решения проблем и перспективы использования органических удобрений животного происхождения в органическом земледелии, в том числе внедрение цифровых платформ для калибровки питательных свойств, комплексное применение с микробиологическими препаратами и биоуглём, развитие технологий анаэробного сбраживания и пиролиза.

Ключевые слова: органические удобрения, побочные продукты животноводства, органическое земледелие, экономика замкнутого цикла, экологическая эффективность.

Введение

Современное сельское хозяйство стоит перед беспрецедентными вызовами, связанными с необходимостью обеспечения продовольственной безопасности растущего населения планеты при одновременном снижении негативного воздействия на окружающую среду. Традиционные минеральные удобрения, обеспечивающие до 40–60 % прироста урожайности сельскохозяйственных культур, являются источником значительных экологических проблем, включая эвтрофикацию водоёмов, загрязнение грунтовых вод нитратами и эмиссию парниковых газов [8]. В этом контексте органическое земледелие, основанное на использовании возобновляемых ресурсов и минимизации применения синтетических веществ, рассматривается как перспективная альтернатива, способствующая достижению Целей устойчивого развития ООН [11]. Особое место в системе органического земледелия занимают побочные продукты животноводства — навоз крупного рогатого скота, свиной навоз, птичий помёт. Ежегодно в мире образуются миллиарды тонн этих отходов, которые при нерациональном использовании становятся источником загрязнения окружающей среды, однако при правильной переработке представляют собой ценный ресурс для восполнения почвенного плодородия. Концепция экономики замкнутого цикла в агропродовольственном секторе предполагает максимально полное возвращение питательных элементов из органических отходов в агроэкосистемы, что позволяет сократить зависимость от импортных минеральных удобрений и снизить углеродный след сельскохозяйственного производства [11].

Целью статьи является анализ экологической эффективности использования органических удобрений, полученных из побочных продуктов животноводства, в системах органического земледелия, а также выявление основных проблем и перспектив их применения. Новизна исследования заключается в комплексном рассмотрении не только агрономических аспектов применения органических удобрений животного происхождения, но и их влияния на углеродный баланс агроэкосистем, биоразнообразие почвенной микробиоты и эмиссию парниковых газов, а также в анализе современных технологий обработки навоза и помёта, повышающих экологическую эффективность их использования.

Материалы и методы исследования

Исследование базируется на анализе и обобщении данных отечественных и зарубежных научных публикаций, посвящённых изучению эффективности органических удобрений животного происхождения. Использованы материалы полевых опытов, вегетационных экспериментов и лабораторных исследований, опубликованные в научных изданиях. Рассмотрены технологии переработки побочных продуктов животноводства, включая компостирование, анаэробное сбраживание, вермикомпостирование и производство органоминеральных удобрений с добавлением биоугля и микробиологических препаратов.

Результаты и обсуждения

Многочисленные исследования подтверждают, что применение органических удобрений на основе навоза и помёта способствует повышению урожайности сельскохозяйственных культур, сопоставимому с использованием минеральных удобрений. Например, в условиях лесостепи Заволжья комплексное применение многокомпонентных органических удобрений на основе диатомита и цеолита совместно с биопрепаратами обеспечило прибавку урожайности твёрдой яровой пшеницы на 54,4 % по сравнению с контролем и на 20,2 % по сравнению с применением пестицидов [4]. Исследования, проведённые в Кабардино-Балкарской Республике, показали, что сочетание навоза, сидератов и соломы с биоактивацией почвы способствует повышению урожая озимой пшеницы на 0,24 т/га относительно варианта с внесением минеральных удобрений [3].

Важно отметить, что органические удобрения не только обеспечивают растения элементами питания, но и улучшают физико-химические свойства почвы. Их применение способствует увеличению содержания органического вещества, улучшению структуры почвы, повышению влагоудерживающей способности и активизации почвенной микробиоты [8]. Исследования австралийских учёных показали, что добавление 5 % компоста в песчаный субстрат модулировало рост и фенологию растений, увеличивая кущение и продукцию метёлок у зерновых культур, что подтверждает наличие в органических удобрениях веществ, стимулирующих рост растений, помимо основных элементов питания [11].

Одним из главных преимуществ использования органических удобрений животного происхождения является их способность увеличивать пул органического углерода в почве, что способствует смягчению последствий изменения климата. По оценкам зарубежных исследователей, глобальное внедрение «прецизионной компостной стратегии» позволило бы увеличить содержание органического углерода в пахотных почвах на 19,5 Пг, что составляет около 26,5 % от текущего уровня [11]. Органоминеральные удобрения, обогащённые биоуглём, способствуют снижению выщелачивания питательных веществ до 40 %, увеличивают микробное разнообразие на 25 % и стабилизируют почвенный углерод [1, 8].

Применение органических удобрений позволяет существенно сократить эмиссию парниковых газов по сравнению с использованием минеральных анало-

гов. Подкисление свиного навоза серной кислотой и его последующее компостирование снижает эмиссию аммиака на 60 %, а выбросы углекислого газа — на 30–40 %. В исследовании, проведённом в рамках европейского проекта Econutri, показано, что использование органоминеральных удобрений на основе переработанных органических отходов позволяет сократить выбросы парниковых газов до 30 % по сравнению с традиционными минеральными удобрениями [12]. Исследования других учёных демонстрируют, что применение комплекса органических удобрений с биоактивацией почвы обеспечивает климатический эффект в размере 23,5 т CO_2-экв на гектар [3].

Органические удобрения животного происхождения способствуют улучшению фитосанитарной обстановки в агроценозах за счёт активизации антагонистической микробиоты и повышения иммунитета растений. Российские исследователи установили, что совместное применение дражирования семян и биопрепаратов по вегетации сокращает распространённость корневых гнилей в среднем на 44,6 % по озимой ржи, 49,4 % по твёрдой яровой пшенице и 50,5 % по ячменю по сравнению с контролем. Снижение распространённости бурой листовой ржавчины достигало 46,4 % по озимой ржи и 57,8 % по твёрдой яровой пшенице [4]. Это позволяет существенно сократить или полностью отказаться от применения химических фунгицидов, что является ключевым принципом органического земледелия.

Современные технологии позволяют значительно повысить экологическую и агрономическую эффективность использования побочных продуктов животноводства. Компостирование остаётся наиболее доступным и широко распространённым методом переработки, однако оно требует значительного времени (от 6 до 12 месяцев) и сопровождается потерями азота в процессе аммонификации. Более перспективными представляются технологии анаэробного сбраживания с получением биогаза и органоминеральных удобрений, а также производство биоугля путём пиролиза органических отходов [1].

Особого внимания заслуживает подход, основанный на калибровке питательных свойств органических удобрений под конкретные культуры и почвенные условия. Международные исследования показывают, что использование компоста в качестве единственного источника азота часто приводит к снижению урожайности по сравнению с минеральными удобрениями, однако оптимальные смеси органических рециклатов с добавлением минерального азота позволяют достичь сопоставимых результатов [11]. Это указывает на необходимость разработки органоминеральных удобрений с заданными свойствами, адаптированных к потребностям конкретных сельскохозяйственных культур.

Перспективным направлением является обогащение органических удобрений микробиологическими препаратами, содержащими азотфиксирующие и фосфатмобилизующие микроорганизмы. Российские учёные из Пермского национального исследовательского политехнического университета разработали биоудобрение на основе гуминовых кислот торфа, ионов кобальта и бактерий Bacillus subtilis, которое при испытаниях на редисе увеличило массу корнеплодов на 22,64 % по сравнению с контролем [5]. Такие комплексные препараты сочетают питательную и защитную функции, что особенно ценно в системах органического земледелия.

Несмотря на очевидные экологические и агрономические преимущества, широкомасштабное внедрение органических удобрений животного происхождения в практику органического земледелия сопряжено с рядом существенных проблем, требующих комплексного подхода к их решению.

Одной из наиболее острых проблем является потенциальная опасность загрязнения почв и растениеводческой продукции тяжёлыми металлами, патогенными микроорганизмами, антибиотиками и гормональными препаратами, которые могут присутствовать в не переработанном должным образом навозе и помёте. Исследования показывают, что бессистемное длительное применение высоких доз птичьего помёта способно приводить к накоплению в почве цинка, меди и кадмия, концентрации которых в ряде случаев превышают предельно допустимые значения [8]. Решением данной проблемы выступает внедрение систем обязательного контроля качества органических удобрений на всех этапах их производства и применения, а также разработка национальных стандартов, гармонизированных с международными требованиями к органической продукции. Технологии анаэробного сбраживания и пиролиза позволяют существенно снизить содержание патогенов и семян сорных растений, а также частично иммобилизовать тяжёлые металлы в недоступной для растений форме [6].

Низкая концентрация питательных элементов в органических удобрениях по сравнению с минеральными аналогами обусловливает высокие транспортные издержки и делает экономически нецелесообразным их перевозку на расстояния, превышающие 50–100 км от мест производства. Это ограничивает возможности использования побочных продуктов животноводства в регионах с высокой распаханностью земель и недостаточным поголовьем скота. Перспективным направлением преодоления данного барьера является развитие децентрализованных систем переработки органических отходов непосредственно в местах их образования с получением концентрированных органоминеральных удобрений, пригодных для транспортировки и внесения

современной сельскохозяйственной техникой. Технологии гранулирования, сушки и обогащения органических удобрений минеральными добавками позволяют повысить содержание питательных элементов до 15–20 %, что делает их логистически сопоставимыми с традиционными удобрениями [4,7].

Вариабельность химического состава органических удобрений, обусловленная видом животных, рационами кормления, технологиями содержания и способами переработки, затрудняет точное прогнозирование их удобрительной ценности и доз внесения [6, 9]. В результате аграрии либо недополучают урожай из-за недостаточного питания растений, либо сталкиваются с экологическими рисками, связанными с избыточным поступлением азота и фосфора в окружающую среду. Решением данной проблемы выступает внедрение методов оперативной диагностики состава органических удобрений непосредственно перед их внесением, а также разработка цифровых платформ и калькуляторов, позволяющих на основе известных характеристик сырья и технологий его переработки прогнозировать удобрительную ценность конечного продукта.

Переход на органические удобрения требует от сельхозтоваропроизводителей значительных инвестиций в приобретение специализированной техники для внесения, строительство хранилищ и приобретение технологических линий для переработки навоза. В краткосрочной перспективе такие вложения могут снижать рентабельность производства, особенно в условиях отсутствия государственной поддержки [2]. В этой связи необходима разработка и реализация программ субсидирования приобретения оборудования для переработки органических отходов, а также создание системы «зелёного» кредитования для производителей органической продукции.

Дальнейшее развитие использования органических удобрений животного происхождения в органическом земледелии будет определяться несколькими тенденциями. Прежде всего, ожидается совершенствование технологий переработки, направленное на получение продуктов с заданными, стабильными свойствами, адаптированными к потребностям конкретных культур и почвенно-климатических условий. Особое внимание будет уделяться разработке органоминеральных удобрений пролонгированного действия, сочетающих быстрый и медленный пулы азота, что позволит синхронизировать питание растений с их потребностями в течение вегетации.

Перспективным направлением является интеграция органических удобрений в системы точного земледелия. Использование спутниковой навигации, дистанционного зондирования и датчиков состояния почвы позволяет вносить органику дифференцированно, с учётом пространственной неоднородности почвенного плодородия, что повышает коэффициент использования питательных веществ и минимизирует экологические риски. Исследования показывают, что дифференцированное применение органических и минеральных удобрений повышает продуктивность севооборота на 5–8 % по сравнению с равномерным внесением и снижает пространственную вариабельность агрохимических свойств почвы с 46 % до 23 % [10].

Наконец, важнейшей перспективой является признание роли органических удобрений в смягчении последствий изменения климата. Включение почвенного углерода, секвестрированного при применении органики, в национальные системы торговли углеродными единицами создаст дополнительный источник дохода для сельхозтоваропроизводителей и будет стимулировать переход к экономике замкнутого цикла в агропромышленном комплексе.

Выводы

Экологическая эффективность использования органических удобрений, полученных из побочных продуктов животноводства, в органическом земледелии подтверждается комплексом научных данных. Применение данных удобрений позволяет одновременно решать несколько задач: утилизировать отходы животноводства, восполнять почвенное плодородие, повышать продуктивность сельскохозяйственных культур и снижать негативное воздействие на окружающую среду. Ключевыми экологическими преимуществами являются сокращение выщелачивания питательных веществ, снижение эмиссии парниковых газов по сравнению с минеральными удобрениями и увеличение пула органического углерода в почве, что способствует секвестрации углерода и смягчению последствий изменения климата. Дополнительным положительным эффектом выступает улучшение фитосанитарного состояния посевов, позволяющее сократить применение пестицидов. Важным условием успешного использования органических удобрений животного происхождения является их калибровка под конкретные почвенно-климатические условия и биологические особенности возделываемых культур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гребёнкина О.А., Александрова Л.Р., Старостин А.Г. Исследование способа грануляции минеральных удобрений с биоуглем с различными связующими // Сборник трудов Международной научно-практической конференция «Химия. Экология. Урбанистика», Пермь, 26–28 марта 2025 года. — Пермь: ПНИПУ, 2025. — С. 105–109.
2. Дибирова Х.А. Оценивание потенциала органического сельскохозяйственного производства региона с использованием экспертных знаний / Х.А. Дибирова, В.А. Спесивцев, А.В. Спесивцев // Аграрный научный журнал. — 2025. — № 6. — С. 98–107. — DOI 10.28983/asj. y2025i6pp98-107.
3. Занилов А.Х., Лешкенов А.М., Конова С.Р. Экономическое и климатическое обоснование приема биоактивации почвы для развития органического земледелия в Кабардино-Балкарской Республике // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. — 2025. — № 6. — С. 25–38. — DOI: https://doi.org/10.26897/0021-342X-2025-6-25-38.
4. Оленин О.А., Зудилин С.Н., Сафин Х.М. Комплексное применение органических удобрений и биопрепаратов в зернопаровом севообороте в условиях органического земледелия // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. — 2025. — Т. 55. — № 12. — С. 5–14. — DOI: 10.26898/0370-8799-2025-12-1.
5. Урожайность выросла на 22% без химии. В России создали органическое удобрение // Поиск — новости науки и техники. — 2025. — 23 сентября. — URL: https://poisknews.ru/selskoe-hozyajstvo (дата обращения: 05.03.2026)
6. Федорова Е.Д., Железова А.Д., Тхакахова А.К. Влияние разных органических удобрений на таксономическое и физиологическое разнообразие микробиома дерново-подзолистой почвы и чернозема по результатам лабораторного эксперимента // Сборник тезисов докладов «Почвоведение. Горизонты будущего — 2025», Москва, 22–26 сентября 2025 года. — Москва: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2025. — С. 101–103.
7. Черников Е.А., Ярошенко О.В., Ушакова Я.В. Влияние применения органоминеральных удобрений на физические, агрохимические и микробиологические характеристики структурно-метаморфического агрозема в условиях монокультуры сада // Субтропическое и декоративное садоводство. — 2025. — № 92. — С. 195–207. DOI: 10.31360/2225-3068-2025-92-195-207.
8. Chojnacka K., Baltrusaitis J. Organo-mineral fertilizers for sustainable agriculture // Sustainability Science and Technology. — 2025. — Vol. 2. — № 2. — P. 022001. — DOI: 10.1088/2977-3504/adc0a8.
9. Hidalgo D., Martín-Marroquín J.M., Corona F., Verdugo F. Waste-Derived Fertilizers: Conversion Technologies, Circular Bioeconomy Perspectives and Agronomic Value // Agronomy. — 2025. — №15. — pp. 2167.
10. Ivanov A.I., Ivanova Zh.A., Konashenkov A.A. Precision fertilizer system as a factor in optimizing the agrochemical properties of soddy-podzolic soil // AGRIS. — 2021. — №1. — pp. 28–32.
11. Schmidt S., Krishnan V., Gamage H. et al. Enabling the circular nitrogen economy with organic and organo-mineral fertilisers // Nutrient Cycling in Agroecosystems. — 2025. — Vol. 130. — pp. 33–48. — DOI: 10.1007/s10705-024-10380-7.
12. Technologies for nutrient calibration of materials derived from biowaste processing. ECONUTRI Project // European Union Research Framework Programme. — 2025. — URL: https://econutri-project.eu (date of application: 05.03.2026).

© Тюрин Владимир Григорьевич (potyemkina@mail.ru); Волчкова Лалита Анзориевна (lolita_volchkova@mail.ru);
Родионова Наталья Владимировна (rodionovanatasha@bk.ru); Бирюков Кирилл Николаевич (19kirill85@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.01

ОБЛЕГЧЁННАЯ САМОКОНТРОЛИРУЕМАЯ ЭКГ-АУТЕНТИФИКАЦИЯ ДЛЯ IOT-ДАТЧИКОВ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ

LIGHTWEIGHT SELF-SUPERVISED ECG AUTHENTICATION FOR RESOURCE-CONSTRAINED IOT EDGE SENSORS

M. Azab
A. Sila
V. Korzhuk

Summary. This paper proposes a lightweight ECG biometric authentication framework for wearable IoT devices using CNN-based feature extraction and self-supervised contrastive learning. The approach enables effective training using unlabeled ECG signals and improves cross-dataset generalization. The model achieved 99.15% accuracy on the PTB dataset and maintained over 98.5% accuracy on MIT-BIH and ECG-ID datasets without retraining. Model optimization through pruning and quantization reduced computational requirements with minimal performance loss, achieving 98.67% accuracy. The findings demonstrate the feasibility of deploying robust ECG authentication on resource-limited IoT edge platforms.

Keywords: electrocardiogram authentication, contrastive learning, IoT devices.

Азаб Мохамед Абдалла Эльсайед
Аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург
mohamed.a.azab@itmo.ru
Сила Анастасия Станиславовна
Университет ИТМО, Санкт-Петербург
cstfokina@gmail.com
Коржук Виктория Михайловна
Доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург
vmkorzhuk@itmo.ru

Аннотация. В статье представлен облегчённый метод биометрической аутентификации пользователей по ЭКГ для носимых IoT-устройств. Подход основан на извлечении признаков с использованием сверточных нейронных сетей и самоконтролируемого контрастивного обучения, что позволяет использовать большие объёмы неразмеченных данных и повышает устойчивость модели. На базе PTB достигнута точность 99,15 %, а при тестировании на базах MIT-BIH и ECG-ID точность превысила 98,5 % без дополнительного обучения. Применение методов квантования и прореживания уменьшило вычислительную нагрузку при сохранении точности 98,67 %. Полученные результаты подтверждают возможность внедрения предложенного метода в IoT-датчики с ограниченными вычислительными ресурсами.

Ключевые слова: аутентификация по электрокардиосигналу, контрастивное обучение, устройства интернета вещей.

Введение

Биометрическая аутентификация широко применяется в киберфизических системах благодаря высокой надёжности и удобству использования. Традиционные биометрические признаки, включая отпечатки пальцев, распознавание лица, радужной оболочки глаза и голоса, используются для подтверждения личности пользователя при входе в систему [1]. Однако большинство систем применяют одноразовую аутентификацию, что может привести к несанкционированному доступу во время бездействия пользователя. Методы непрерывной аутентификации позволяют повысить уровень безопасности за счёт постоянной проверки личности пользователя [2]. По сравнению с паролями биометрические методы обеспечивают более высокий уровень защиты и удобства.

Носимые устройства Интернета вещей (IoT) позволяют пассивно и непрерывно собирать физиологические сигналы, что делает их перспективными для реализации непрерывной аутентификации [3, 4]. Среди физиологических биометрических признаков электрокардиосигнал (ЭКГ) обладает высокой индивидуальностью, универсальностью и устойчивостью к подделке [5]. Кроме того, ЭКГ-данные широко доступны для научных исследований [6]. Методы глубокого обучения, особенно сверточные нейронные сети (CNN), эффективно извлекают информативные признаки из ЭКГ-сигналов для задач аутентификации [7]. Однако большинство существующих систем аутентификации по ЭКГ используют ограниченные наборы данных и тестируются на тех же данных, что снижает их обобщающую способность [8–9]. Дополнительные сложности связаны с масштабируемостью, изменчивостью ЭКГ-сигналов, высокими требованиями к точности и ограниченными вычислительными ресурсами носимых устройств [14].

В данной работе предложен облегчённый метод аутентификации по ЭКГ для IoT-устройств, основанный на самоконтролируемом контрастивном обучении и использовании CNN-энкодера для автоматического извлечения признаков. Для повышения эффективности внедрения применяются методы оптимизации модели, включая квантование и прореживание, что позволяет обеспечить высокую точность аутентификации при ограниченных вычислительных ресурсах.

Литературный обзор

В данном разделе рассматриваются современные методы биометрической аутентификации по ЭКГ и подходы к извлечению признаков на основе сверточных нейронных сетей. Методы аутентификации по ЭКГ обычно подразделяются на фидуциальные, нефидуциальные и гибридные в зависимости от используемых признаков [10]. Фидуциальные методы используют характерные точки сигнала ЭКГ (волны P, Q, R, S и T) для извлечения временных и амплитудных признаков. Например, Tantawi и соавт. применили вейвлет-разложение интервалов RR и достигли точности 97,7 % на базе PTB, однако метод требовал ручного выбора признаков и не позволял выявлять неизвестных пользователей [8]. Аналогично, Yang и соавт. реализовали систему аутентификации на основе фидуциальных признаков на платформе Raspberry Pi, но получили сравнительно высокий уровень ошибок — 8,67 % [11]. Нефидуциальные методы извлекают признаки ЭКГ без определения характерных точек сигнала и обычно используют методы цифровой обработки сигналов. Hejazi и соавт. применили дискретное вейвлет-преобразование и классификатор SVM, достигнув точности 94,54 % на небольшом наборе данных, однако метод требовал сложной предварительной обработки [12]. Agrafioti и соавт. использовали автокорреляцию и линейный дискриминантный анализ совместно с методом ближайших соседей, достигнув точности 92,3 %, но столкнулись с ограничениями производительности и масштабируемости [13]. Huang и соавт. разработали IoT-систему сбора данных с точностью F1 около 97 %, однако отсутствие встроенного механизма инференса ограничивает практическое применение.

Методы на основе CNN значительно повысили эффективность аутентификации по ЭКГ за счёт автоматического извлечения информативных признаков. Hammad и соавт. использовали CNN совместно с классификатором QG-MSVM и достигли точности 98,66 % [11]. Ghazarian и соавт. обучили CNN на крупном наборе данных ЭКГ, продемонстрировав высокую точность идентификации, но выявили потенциальные риски конфиденциальности [14]. Метод Deep-ECG обеспечил точность 100 % на небольших наборах данных [13]. Однако большинство существующих систем демонстрируют слабую обобщающую способность и высокую вычислительную сложность, что ограничивает их применение в носимых устройствах [8–13].

Контрастивное обучение является перспективным методом самоконтролируемого обучения, позволяющим уменьшить зависимость от размеченных данных и повысить устойчивость моделей [9]. Архитектуры MoCo и SimCLR показали высокую эффективность при обучении признаковых представлений путём сравнения схожих и различающихся выборок [12]. Современные исследования успешно применяют контрастивное обучение для анализа ЭКГ и повышения качества классификации [13]. Несмотря на это, многие существующие системы остаются ограниченными по масштабируемости и вычислительной эффективности [14]. С учётом указанных ограничений в данной работе предложен облегчённый метод аутентификации по ЭКГ на основе CNN и контрастивного обучения, направленный на повышение обобщающей способности и снижение вычислительной сложности для внедрения в IoT-устройства.

Материалы и методы

В данном разделе представлен метод биометрической аутентификации по ЭКГ на основе сверточной нейронной сети, включающий два основных этапа: обучение и аутентификацию. На этапе обучения неразмеченные ЭКГ-сигналы проходят предварительную обработку и подаются в модель контрастивного обучения, которая формирует признаковые векторы с использованием CNN-энкодера. Параметры энкодера обновляются посредством оптимизации функции потерь. Этап аутентификации включает предварительную обработку данных, извлечение признаков, вычисление сходства и принятие решения. При регистрации пользователей формируются уникальные признаковые векторы, которые сохраняются в базе данных. При попытке входа формируется новый вектор признаков, который сравнивается с сохранёнными векторами с использованием коэффициента корреляции Пирсона. Общая схема обучения и аутентификации представлена на Рис. 1 и Рис. 2.

Предварительная обработка данных направлена на удаление шумов и сегментацию ЭКГ-сигналов. Сигналы, полученные с носимых датчиков, могут содержать дрейф базовой линии, мышечные шумы и сетевые помехи, которые устраняются с помощью полосового фильтра. После фильтрации выполняется сегментация сигналов. В работе рассматриваются три метода сегментации: сегментация между R-пиками, сегментация между P— и T-пиками и сегментация без определения пиков. Метод R2R использует обнаружение R-пиков, но может приводить к ошибкам при неточном определении пиков. Метод P2T обеспечивает выделение полного сердечного цикла, однако увеличивает вычислительную сложность. Метод NPD использует фиксированные временные окна без обнаружения пиков, что снижает вычислительную сложность и сохраняет непрерывность сигнала. Примеры сегментации представлены на Рисунке 3.

Извлечение признаков выполняется с использованием одномерной сверточной нейронной сети, предназначенной для анализа временных характеристик ЭКГ-сигналов. Архитектура сети включает несколько сверточных слоёв с функцией активации ReLU и слои подвыборки, за которыми следует полносвязный слой



Рис. 1. Обучение на основе контрастивного подхода



Рис. 2. Блок-схема процессов регистрации и аутентификации пользователя

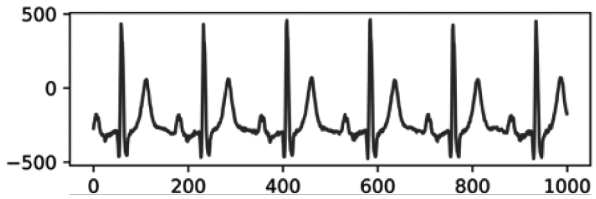


Рис. 3. Сегментация сигнала

для формирования высокоразмерных признаковых векторов. Архитектура энкодера представлена на Рисунке 4. Полученные векторы признаков представляют уникальные биометрические характеристики пользователей и сохраняются при регистрации.

Аутентификация выполняется путём сравнения вектора признаков входного ЭКГ-сигнала с сохранёнными в базе данных. Для оценки сходства используется коэффициент корреляции Пирсона, который позволяет эффективно сравнивать временные сигналы и не зависит от масштаба данных. Если значение коэффициента превышает заданный порог, пользователь считается успешно аутентифицированным.

Для повышения масштабируемости системы и уменьшения зависимости от размеченных данных используется контрастивное обучение. В работе применяются две архитектуры: сиамская модель и триплетная модель. Сиамская модель сравнивает пары сегментов ЭКГ и обучает модель уменьшать расстояние между похожими сигналами и увеличивать расстояние между различными сигналами. Триплетная модель расширяет этот подход, используя якорный, положительный и отрицательный образцы для повышения различимости признаков. Процесс обучения триплетной модели представлен на Рисунке 5. Использование данных архитектур позволяет повысить обобщающую способность модели и обеспечить эффективное внедрение системы в IoT-устройства.

Результаты

В работе использованы три общедоступные базы данных ЭКГ. База PTB Diagnostic ECG Database (PTBDB) [12] применялась для обучения и основной оценки модели. Она содержит 549 записей ЭКГ от 290 испытуемых, записанных с использованием 12 отведений с частотой дискретизации 1000 Гц. Из этой базы формировались признаковые векторы зарегистрированных пользователей. Для проверки обобщающей способности модели использовались две ранее неизвестные базе обучения базы данных. MIT-BIH Arrhythmia Database (MITDB) [13] содержит 48 записей ЭКГ от 47 испытуемых с частотой дискретизации 360 Гц. ECG-ID Database (ECGIDDB) [14] включает 310 записей от 90 испытуемых с частотой дискретизации 500 Гц. Использование различных баз дан-

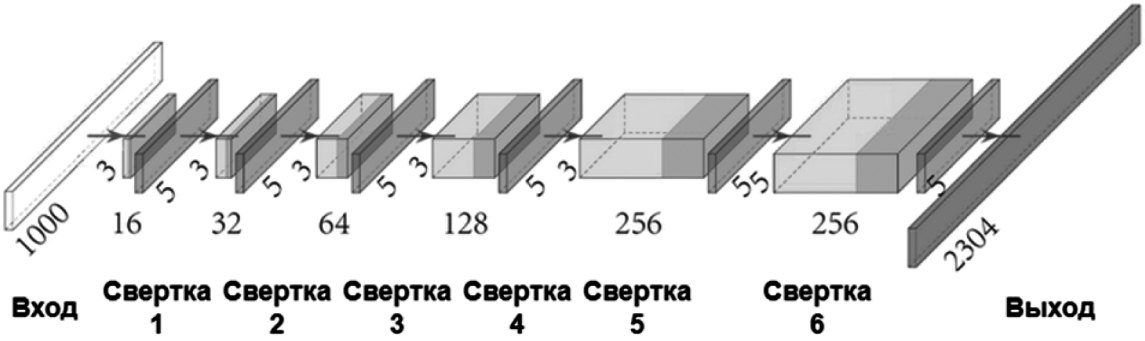


Рис. 4. Сегментация сигнала

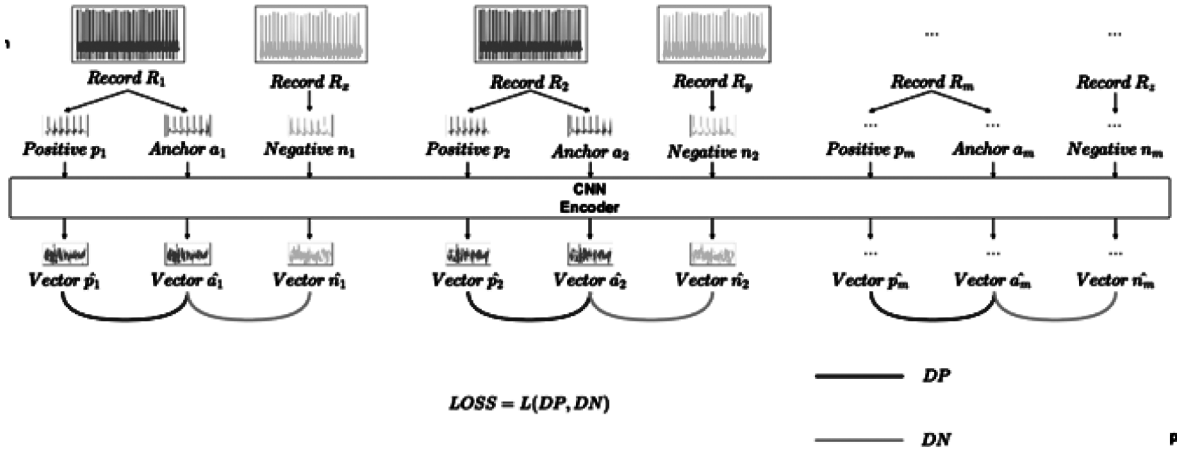


Рис. 5. Рабочий процесс триплетного контрастивного обучения за одну эпоху

ных позволило оценить устойчивость системы к различным условиям регистрации сигналов и шумам.

Эксперименты показали, что триплетная модель контрастивного обучения превосходит сиамскую модель по всем метрикам качества. Метод сегментации P2T обеспечил наивысшую точность благодаря сохранению полного сердечного цикла. Метод R2R показал несколько меньшую точность из-за возможного нарушения структуры сердечных циклов при сегментации. Метод NPD продемонстрировал конкурентоспособные результаты, несмотря на случайный характер сегментации, что свидетельствует о способности нейронной сети извлекать информативные признаки.

Таблица 1.

Сравнение методов сегментации и обучающих архитектур на базе PTBDB

Сегментация	Обучение	Точность (%)	Полнота (%)	Точность (%)
NPD	Siamese	96.33	98.7	97.53
NPD	Triplet	98.52	99.78	99.15
R2R	Siamese	95.81	96.37	96.1
R2R	Triplet	97.06	98.04	97.56
P2T	Siamese	98.04	97.67	97.85
P2T	Triplet	99.28	99.04	99.16

Модель, обученная на базе PTBDB, была протестирована на базах MITDB и ECGIDDB без изменения параметров модели. Полученные результаты показали высокую точность аутентификации на ранее неизвестных данных. Метод сегментации NPD показал наилучшие результаты и высокую устойчивость к различиям условий регистрации сигналов. Кроме того, данный метод снижает вычислительную сложность за счёт отсутствия этапа обнаружения пиков, как показано в Таблице 2.

Таблица 2.

Сравнение методов предобработки и тестовых наборов данных

Сегментация	Набор данных	Точность (%)	Полнота (%)	Точность (%)
NPD	MITDB	98.24	99.09	98.67
NPD	ECG	98.32	99.21	98.77
R2R	MITDB	92.45	94.34	93.45
R2R	ECGIDDB	92.9	95.03	94.02
P2T	MITDB	94.06	95.28	94.7
P2T	ECGIDDB	95.3	97.68	96.52

Выбор порогового значения существенно влияет на показатели FAR и FRR. Эксперименты показали, что

оптимальный диапазон порога обеспечивает баланс между безопасностью и удобством использования системы. Для оценки дискриминационной способности системы были построены ROC-кривые. Все методы сегментации продемонстрировали высокие значения площади под ROC-кривой (AUC) на базе PTBDB, при этом метод NPD показал наилучшую обобщающую способность, как показано на Рис. 6 и 7.

Для внедрения системы в IoT-устройства были применены методы оптимизации модели, включая квантование и прореживание. Квантование позволило уменьшить размер модели и ускорить инференс при минимальном снижении точности. Прореживание дополнительно уменьшило вычислительную сложность при сохранении высокой точности. Результаты экспериментов подтверждают возможность применения предложенной модели в ресурсно-ограниченных встроенных системах, показано на Рис 8.

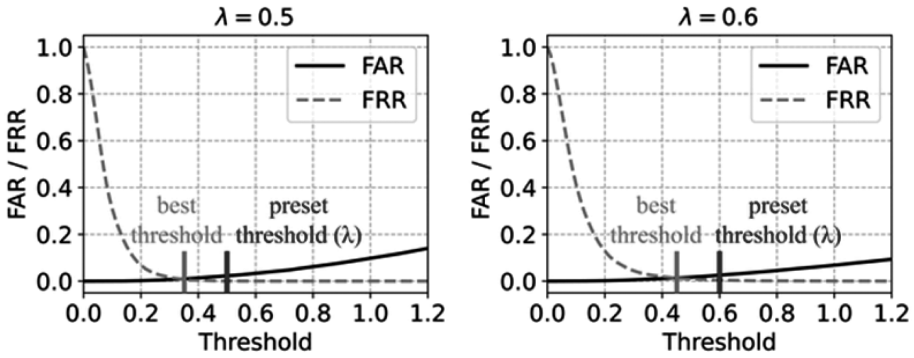


Рис. 6. Зависимость FAR и FRR от порогового значения

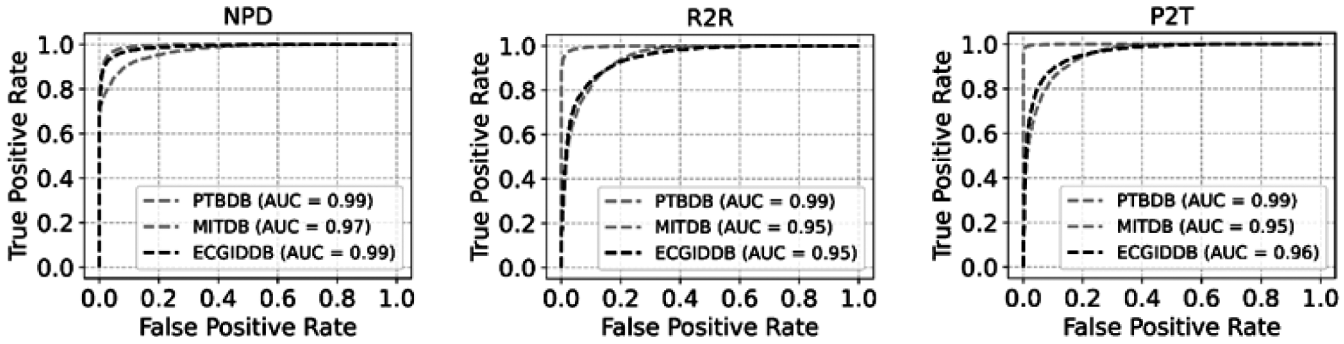


Рис. 7. ROC-кривые различных методов предобработки на наборах данных

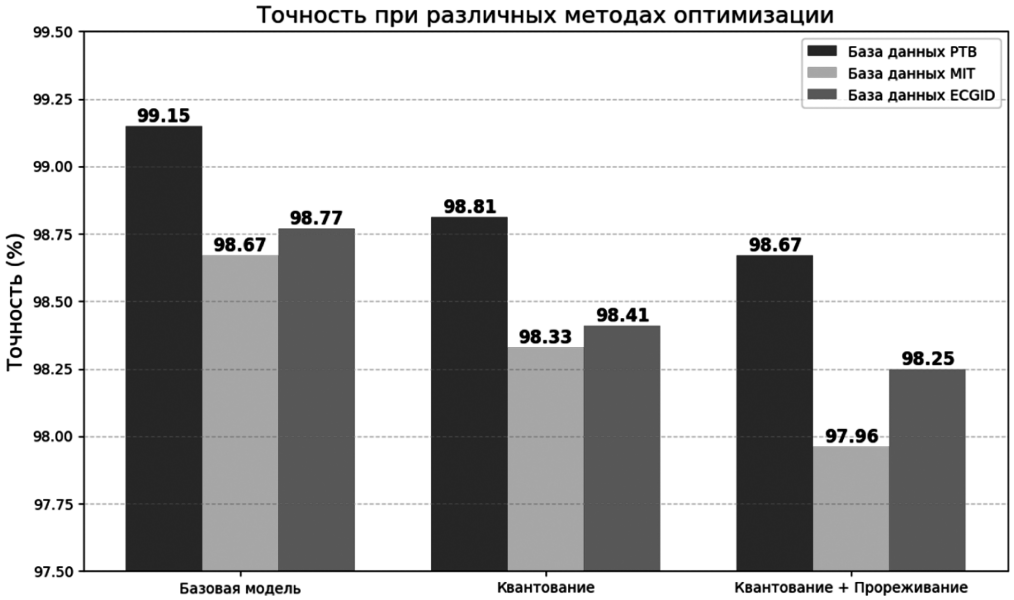


Рис. 8. Точность при различных методах оптимизации

Заключение

В работе предложена облегчённая система биометрической аутентификации по ЭКГ, основанная на сверточных нейронных сетях и самоконтролируемом контрастивном обучении. Разработанный метод обеспечивает высокую точность и устойчивость к вариациям сигналов. Применение квантования и прореживания позволило снизить вычислительную сложность и энергопотребление, обеспечив возможность внедрения системы в IoT-устройства. Использование закодированных биометрических признаков повышает уровень защиты персональных данных. Перспективным направлением дальнейших исследований является повышение устойчивости модели и разработка мультимодальных биометрических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тантави М.М., Реветт К., Салем А., Толба М.Ф. Метод извлечения признаков на основе вейвлет-преобразования для биометрического распознавания по ЭКГ // Signal, Image and Video Processing. — 2015. — Т. 9. — С. 1271–1280.
2. Хаммад М., Лю И., Ванг К. Мультимодальная биометрическая аутентификация на основе сверточных нейронных сетей с использованием ЭКГ и отпечатков пальцев // IEEE Access. — 2018. — Т. 7. — С. 26527–26542.
3. Лабати Р.Д., Пьюри В., Скотти Ф. Deep-ECG: сверточные нейронные сети для биометрической идентификации по ЭКГ // Pattern Recognition Letters. — 2019. — Т. 126. — С. 78–85.
4. Хазратифард М., Горбани А., Кешаварзиан П. Ансамблевая сиамская нейронная сеть для аутентификации пользователей по ЭКГ в интеллектуальных медицинских системах // Sensors. — 2023. — Т. 23, № 10. — С. 4727.
5. Сепахванд М., Абдали-Мохаммади Ф. Многоканальное распознавание личности по ЭКГ с использованием временно-частотного представления и морфологических CNN // Biomedical Signal Processing and Control. — 2021. — Т. 68. — Ст. 102766.
6. Хуанг П., Ванг С., Ванг Х. Практическая система конфиденциальной аутентификации по ЭКГ для IoT-здравоохранения // IEEE Internet of Things Journal. — 2019. — Т. 6, № 5. — С. 9200–9210.
7. Газариан А., Чжэн Ц., Струппа Д., Раковски К. Анализ рисков повторной идентификации при использовании алгоритмов глубокого обучения для данных ЭКГ // IEEE Access. — 2022. — Т. 10. — С. 68711–68723.
8. Хэ К., Фан Х., У Ю., Се С., Гиршик Р. Контрастное обучение представлений без учителя с использованием импульсной памяти // Материалы конференции IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2020. — С. 9729–9738.
9. Чен Т., Корнблит С., Норузи М., Хинтон Д. Простой фреймворк контрастивного обучения представлений // Материалы Международной конференции по машинному обучению. — 2020. — С. 1597–1607.
10. Чен Х., Лян И., Ванг С. CLECG: контрастивное обучение для классификации аритмий по ЭКГ // IEEE Signal Processing Letters. — 2021. — Т. 28. — С. 1993–1997.
11. Вэй Ц.Т., Чжан Ц., Ванг И. Contrastive Heartbeats: самоконтролируемое обучение представлений ЭКГ // Материалы IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. — 2022. — С. 1126–1130.
12. Пан Д., Томпкинс У.Дж. Алгоритм обнаружения QRS-комплекса в реальном времени // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. — 1985. — С. 230–236.
13. Муди Г.Б., Марк Р.Г. Значение базы данных MIT-BIH для исследований сердечных аритмий // IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. — 2001. — Т. 20, № 3. — С. 45–50.
14. Ванг Г., Ли З., Чен Л. Низкосложная система биометрической аутентификации по ЭКГ для периферийных IoT-устройств // Материалы IEEE International Conference on Integrated Circuits, Technologies and Applications. — 2020. — С. 145–146.

© Азаб Мохамед Абдалла Эльсайед (mohamed.a.azab@itmo.ru); Сила Анастасия Станиславовна (cstfokina@gmail.com);
Коржук Виктория Михайловна (vmkorzhuk@itmo.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.04

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛЬНОЙ ИНЖЕНЕРИИ

DESIGN OF A COMPLEX PRODUCTION SYSTEM USING THE MODEL-BASED ENGINEERING APPROACH

A. Vlasov

Summary. This paper explores the application of the Model-Based Systems Engineering (MBSE) approach to the design of a production system. The relevance of the study is driven by the increasing complexity of modern industrial systems and the need for formalized descriptions at early stages of the system life cycle. The paper demonstrates that the use of MBSE enables an integrated representation of the system, improves requirements traceability, and reduces design risks. The Arcadia methodology is used as the methodological basis of the study.

Keywords: model-based systems engineering, MBSE, production system, system modeling, Arcadia, Capella.

Власов Артемий Андреевич
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
vlasov.aa@edu.spbstu.ru

Аннотация. В статье рассматривается применение подхода модельно-ориентированной системной инженерии (MBSE) при проектировании производственной системы. Актуальность исследования обусловлена ростом сложности современных производственных процессов, недостаточной скоростью цифровизации большинства производств и необходимостью их формализованного описания на ранних этапах жизненного цикла. В работе показано, что использование MBSE позволяет обеспечить целостное представление системы, повысить прозрачность требований, а также снизить риски ошибок проектирования.

Ключевые слова: разработка систем на основе моделей, MBSE, производственная система, системное моделирование, Arcadia, Capella.

Введение

Современный этап развития промышленности и высокотехнологичных отраслей характеризуется устойчивым ростом сложности наукоёмкой продукции, увеличением степени интеграции аппаратных, программных и информационных компонентов, а также расширением круга заинтересованных сторон, вовлечённых в процессы разработки. Сложные технические системы, создаваемые в таких условиях, обладают многоуровневой архитектурой, выраженной междисциплинарностью и длительным жизненным циклом, что существенно усложняет процессы их проектирования, анализа и сопровождения. В результате возрастает значимость системной инженерии как методологической основы управления разработкой подобных систем.

Традиционно в практике системной инженерии доминировали документно-ориентированные подходы, при которых ключевая информация о системе фиксировалась в виде разрозненных текстовых документов, спецификаций и отчётов. Несмотря на широкое распространение, данный подход демонстрирует ряд существенных ограничений при применении к сложным техническим системам. К числу таких ограничений относятся фрагментация знаний о системе, низкий уровень прослеживаемости требований и архитектурных решений, а также высокая трудоёмкость анализа последствий изменений. По мере роста сложности системы документно-ориентированные методы перестают обеспечивать необходимую целостность и согласованность представления инженерной информации.

В ответ на указанные ограничения в системной инженерии сформировалось направление модельно-ориентированной системной инженерии (Model-Based Systems Engineering, MBSE), предполагающее использование формальных моделей в качестве основного средства описания, анализа и управления знаниями о системе. В рамках MBSE модели заменяют или дополняют традиционные документы, обеспечивая единое информационное пространство, в котором требования, функции, архитектура и поведение системы связаны между собой формализованными отношениями. Такой подход позволяет существенно повысить прозрачность процессов разработки, обеспечить сквозную прослеживаемость инженерных решений и снизить риски, связанные с управлением изменениями.

Особую значимость MBSE приобретает при разработке сложных технических систем, где управление сложностью становится одной из ключевых инженерных задач. Использование архитектурно-центричных методов моделирования позволяет структурировать систему на различных уровнях абстракции, начиная с анализа операционного контекста и заканчивая формированием физической архитектуры. При этом модель выступает не только средством визуализации, но и инструментом формального анализа, поддержки принятия решений и оценки последствий проектных изменений на протяжении всего жизненного цикла системы.

Несмотря на активное развитие MBSE и наличие международных стандартов и методических рекомендаций в области системной инженерии, в настоящее время отсутствуют унифицированные методики формализации сложных технических систем, ориентированные на практическое применение модельно-ориентированного подхода. Большинство существующих работ либо сосредоточено на описании отдельных аспектов MBSE, либо ориентировано на конкретные инструментальные средства и нотации, что затрудняет их обобщение и применение в различных предметных областях. В результате возникает необходимость разработки методического подхода, обеспечивающего систематизированное и воспроизводимое описание сложных технических систем с использованием принципов MBSE.

Целью работы является разработка методического подхода к формализации сложных технических систем на основе модельно-ориентированной системной инженерии.

Описание и проектирование сложных технических систем традиционно являются одной из ключевых задач системной инженерии. В условиях роста сложности наукоёмкой продукции данная задача усложняется необходимостью одновременного учёта технических, программных, информационных и организационных аспектов, а также обеспечения согласованности решений на протяжении всего жизненного цикла системы. В этой связи в научной и инженерной практике сформировался ряд подходов к описанию сложных технических систем, отличающихся степенью формализации, уровнем абстракции и применяемыми средствами представления информации.

В рамках функционального подхода основное внимание уделяется описанию функций системы и их декомпозиции. Такой подход позволяет абстрагироваться от конкретной реализации и сосредоточиться на логике функционирования системы. Функциональные модели широко применяются на ранних этапах проектирования и используются для анализа полноты и корректности требований. Вместе с тем изолированное использование функционального подхода не обеспечивает целостного представления о системе, поскольку не позволяет в полной мере учитывать архитектурные аспекты, распределение функций между компонентами и особенности взаимодействия элементов системы.

Значительное развитие получили архитектурные подходы к описанию сложных технических систем, ориентированные на формализацию структуры и взаимодействий компонентов. В международном стандарте ISO/IEC/IEEE 42010 архитектура системы определяется как фундаментальная организация системы, воплощённая в её компонентах, их отношениях друг с другом и с окружающей средой. Архитектурные описания позволяют представить систему на различных уровнях абстракции и являются важным инструментом управления сложностью. Однако сами по себе архитектурные представления не регламентируют процесс перехода от потребностей и требований к архитектурным решениям, что ограничивает их применение в качестве самостоятельной методологии.

Несмотря на очевидные преимущества, существующие реализации модельно-ориентированного подхода отличаются значительным разнообразием. В практике применяются различные нотации, языки моделирования и инструментальные средства, что затрудняет формирование универсальных методик описания сложных технических систем. Большинство публикаций посвящено либо описанию отдельных инструментов, либо анализу частных аспектов MBSE, таких как управление требованиями или архитектурное моделирование. При этом вопросы последовательной формализации сложной технической системы — от операционного контекста до физической архитектуры — зачастую остаются недостаточно структурированными.

Понятия «сложная техническая система» и «сложность» являются фундаментальными для системной инженерии, однако в научной литературе отсутствуют их универсальные и формально закреплённые определения. Это связано с междисциплинарным характером системных исследований и многообразием контекстов, в которых рассматриваются сложные системы. В связи с этим в рамках настоящей работы используется синтез подходов, сформированных в общей теории систем, теории сложности и международных стандартах системной инженерии.

Одним из основополагающих источников системного подхода является общая теория систем, разработанная Л. фон Берталанфи. В его работах система определяется как совокупность взаимодействующих элементов, образующих целостность, обладающую свойствами, не сводимыми к свойствам отдельных компонентов [Bertalanffy, 1968]. Данный подход подчёркивает принципиальную важность взаимодействий между элементами и вводит представление о целостности как ключевом признаке системы. В рамках этого подхода сложность системы обусловлена не только числом элементов, но и характером связей между ними, а также наличием многоуровневой организации.

В контексте инженерных приложений данные теоретические положения находят отражение в международных стандартах. В стандарте ISO/IEC 15288 сложная система рассматривается как совокупность взаимосвязанных элементов, включающих аппаратные средства, программное обеспечение, персонал, процессы и сред-

ства обеспечения, функционирующих в рамках жизненного цикла [ISO/IEC 15288]. Хотя стандарт не вводит формального определения сложности, он акцентирует внимание на необходимости управления жизненным циклом системы и согласования инженерных решений на различных уровнях абстракции. Таким образом, сложность в инженерном контексте проявляется через многообразие компонентов, дисциплин и стадий жизненного цикла.

Рост сложности наукоёмкой продукции и увеличение междисциплинарных связей в современных технических системах привели к пересмотру традиционных подходов системной инженерии. Документно-ориентированные методы, основанные на текстовых спецификациях и разрозненных инженерных артефактах, демонстрируют ограниченные возможности по управлению сложностью, обеспечению согласованности решений и прослеживаемости требований. В ответ на данные вызовы в системной инженерии сформировался модельно-ориентированный подход, получивший развитие под названием Model-Based Systems Engineering (MBSE), а позже и Model-Based System and Software Engineering (MBSSE), когда развитие IT технологий стало настолько важным и стремительным, что экспертам пришлось дополнить подход для развития также и разработки информационных систем.

Согласно определению Международного совета по системной инженерии (INCOSE), MBSE представляет собой формализованное применение моделей для поддержки процессов определения требований, проектирования, анализа, верификации и валидации системы на протяжении всего её жизненного цикла. При этом ключевым отличием MBSE от традиционных подходов является смещение фокуса с документов на формальные модели как основной носитель инженерных знаний. Полная цепочка соответствия терминов и логики MBSE на рисунке 1.

В отличие от текстовых документов, модели позволяют формально зафиксировать структуру системы, функции, поведение и взаимосвязи между элементами, а также обеспечить согласованность различных инженерных представлений. В рамках MBSE модели становятся средством интеграции инженерных дисциплин и основой для принятия решений на различных уровнях абстракции.

Архитектура рассматривается как фундаментальное средство управления сложностью за счёт декомпозиции системы на уровни и компоненты с чётко определёнными функциями и интерфейсами. В рамках системной инженерии архитектура позволяет связать требования заинтересованных сторон с техническими решениями и обеспечить их трассируемость.

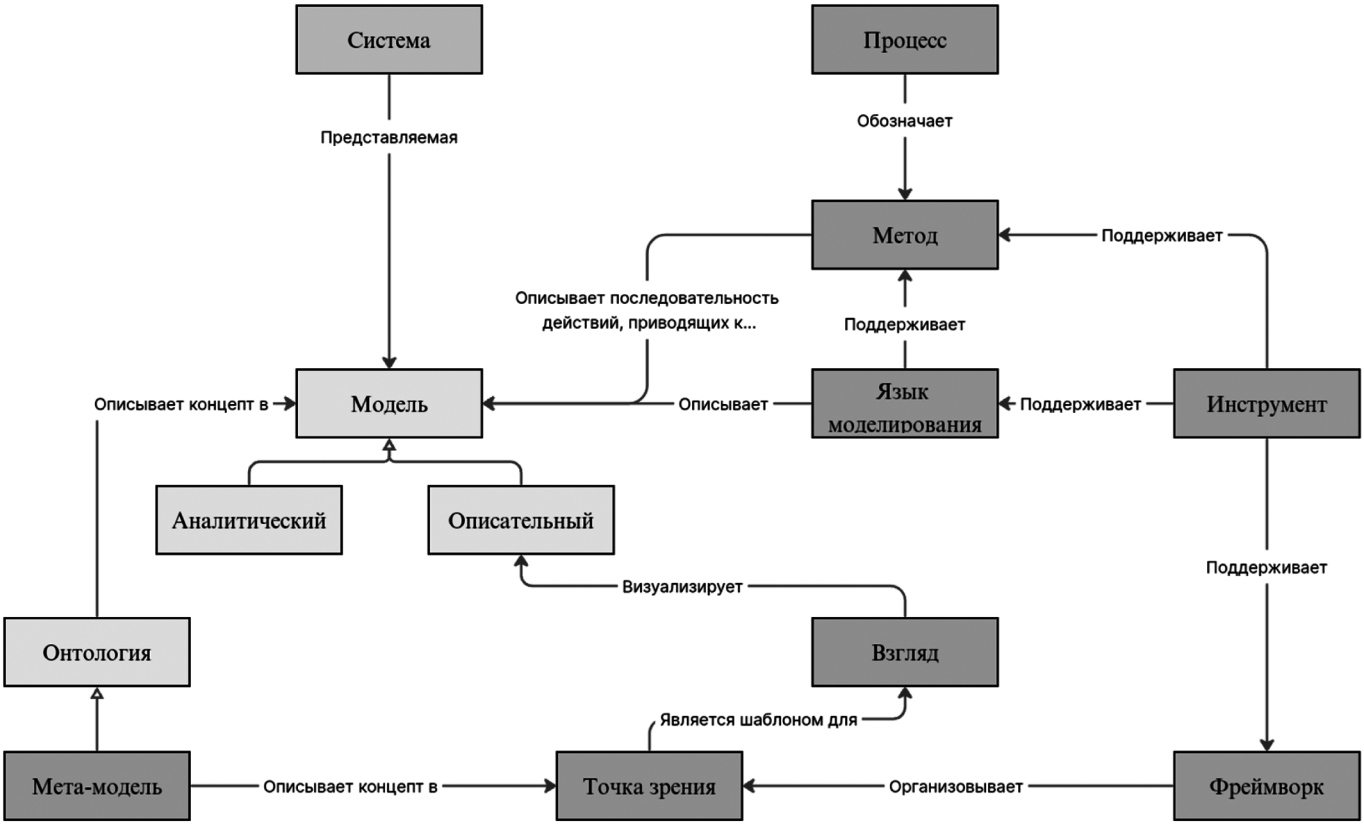


Рис. 1. Концептуальная модель системы терминов стандарта

Одной из наиболее развитых методологических реализаций MBSE является архитектурный метод Arcadia (Architecture Analysis and Design Integrated Approach). Arcadia ориентирована на поэтапное архитектурное описание системы с использованием последовательных уровней абстракции, что позволяет обеспечить непрерывную связь между потребностями заинтересованных сторон и техническими решениями [Roques, 2017]. Метод Arcadia реализован в инструментальной среде Capella и широко применяется в аэрокосмической, транспортной и энергетической отраслях.

Формализация сложной технической системы в условиях высокой степени структурной, функциональной и организационной сложности требует применения методического подхода, обеспечивающего согласованность инженерных решений на различных уровнях абстракции. В рамках модельно-ориентированной системной инженерии такая формализация осуществляется посредством последовательного перехода между архитектурными уровнями описания системы с обеспечением сквозной прослеживаемости требований, функций и технических решений. В настоящем разделе предлагается метод формализации сложной технической системы, основанный на принципах MBSE и архитектурной логике, реализованной в методе Arcadia.

Предлагаемый метод исходит из положений системной инженерии, зафиксированных в ISO/IEC 15288, согласно которым разработка системы должна обеспечивать непрерывную связь между потребностями заинтересованных сторон и реализуемыми техническими решениями на протяжении всего жизненного цикла системы. MBSE в данном контексте рассматривается как средство обеспечения такой связи за счёт использования формальных моделей, выступающих основным носителем инженерных знаний [ISO/IEC 15288; INCOSE SEBoK].

Первоначально система рассматривается в операционном контексте, где фиксируются цели её создания, внешняя среда функционирования и взаимодействие с заинтересованными сторонами. На данном уровне система описывается с точки зрения выполняемых операций и ожидаемых эффектов, без привязки к конкретным техническим решениям [INCOSE, 2015].

Переход к системному уровню предполагает формализацию требований и функций, которые должна реализовывать система для достижения заданных операционных целей. На этом этапе осуществляется трансляция операционных потребностей в системные требования и функциональную архитектуру. Система начинает рассматриваться как совокупность взаимосвязанных функций, обеспечивающих достижение целевых показателей.

Логический уровень служит средством уточнения функциональной архитектуры за счёт определения логических компонентов и их взаимодействий. В отличие от системного уровня, логическая архитектура не привязана к конкретной реализации, но позволяет формализовать распределение функций между логическими сущностями и выявить ключевые интерфейсы [Roques, 2017].

Физический уровень завершает процесс архитектурного уточнения и предполагает отображение логических компонентов на конкретные технические средства, подсистемы и элементы реализации. На данном этапе формализуются физическая структура системы, интерфейсы и ограничения, связанные с выбранными технологиями. При этом физическая архитектура сохраняет связь с предыдущими уровнями, что обеспечивает возможность анализа влияния технических изменений на функциональные и операционные характеристики системы.

Одним из ключевых преимуществ предлагаемого метода является обеспечение сквозной прослеживаемости между уровнями архитектурного описания. В рамках MBSE прослеживаемость рассматривается как способность установить и поддерживать взаимосвязи между требованиями, функциями, архитектурными элементами и результатами верификации [INCOSE SEBoK]. В предлагаемом методе данное свойство реализуется за счёт формального связывания элементов моделей различных уровней.

Сквозная прослеживаемость позволяет анализировать последствия изменений требований на всех этапах архитектурного уточнения и обеспечивает прозрачность инженерных решений.

Предлагаемый метод формализации предполагает, что любые изменения инициируются на соответствующем уровне абстракции и затем транслируются по архитектурной цепочке с сохранением прослеживаемости.

Для демонстрации применимости разработанного метода формализации сложной технической системы на основе модельно-ориентированной системной инженерии в данном разделе рассматривается пример абстрактной производственной системы. Выбор производственной системы обусловлен её типичными признаками сложной технической системы: многоуровневой структурой, наличием большого числа взаимосвязанных подсистем, участием различных заинтересованных сторон, а также необходимостью согласования технических и организационных решений.

Следует подчеркнуть, что целью данной статьи является не детальное описание процесса моделирова-

ния или использование конкретных инструментальных средств, а иллюстрация того, каким образом предложенный метод позволяет формализовать производственную систему и обеспечить управляемость её архитектуры.

В качестве объекта рассмотрения выступает производственная система, предназначенная для выпуска наукоёмкой продукции и включающая совокупность технологического оборудования, систем управления, средств контроля качества и обслуживающей инфраструктуры.

Производственная система в данном контексте рассматривается как целостный объект, взаимодействующий с внешней средой (поставщиками, потребителями, обслуживающим персоналом, информационными системами предприятия).

На операционном уровне формализации фиксируются цели функционирования производственной системы, основные сценарии её использования и взаимодействие с заинтересованными сторонами.

Переход к системному уровню осуществляется посредством трансляции операционных потребностей в системные требования и функции. На данном этапе формализуются основные функции производственной системы, такие как выполнение технологических операций, контроль параметров процесса, управление потоками материалов и данных.

На логическом уровне осуществляется распределение системных функций между логическими компонентами производственной системы. В рамках данного уровня формализуются логические подсистемы, отражающие функциональную структуру системы, а также определяются их взаимодействия.

Физический уровень завершает процесс формализации и предполагает отображение логических компонентов на реальные элементы производственной системы: оборудование, программно-аппаратные комплексы, средства измерений и контроля. На данном этапе фиксируется физическая структура системы и уточняются ограничения, связанные с выбранными технологиями и условиями эксплуатации.

Рассмотренный пример показывает, что предложенный метод формализации сложной технической системы на основе MBSE применим к производственным системам и позволяет структурировать их описание без избыточной детализации. Метод обеспечивает целостное архитектурное представление системы, поддерживает сквозную прослеживаемость и создаёт основу для анализа эффективности и управления изменениями.

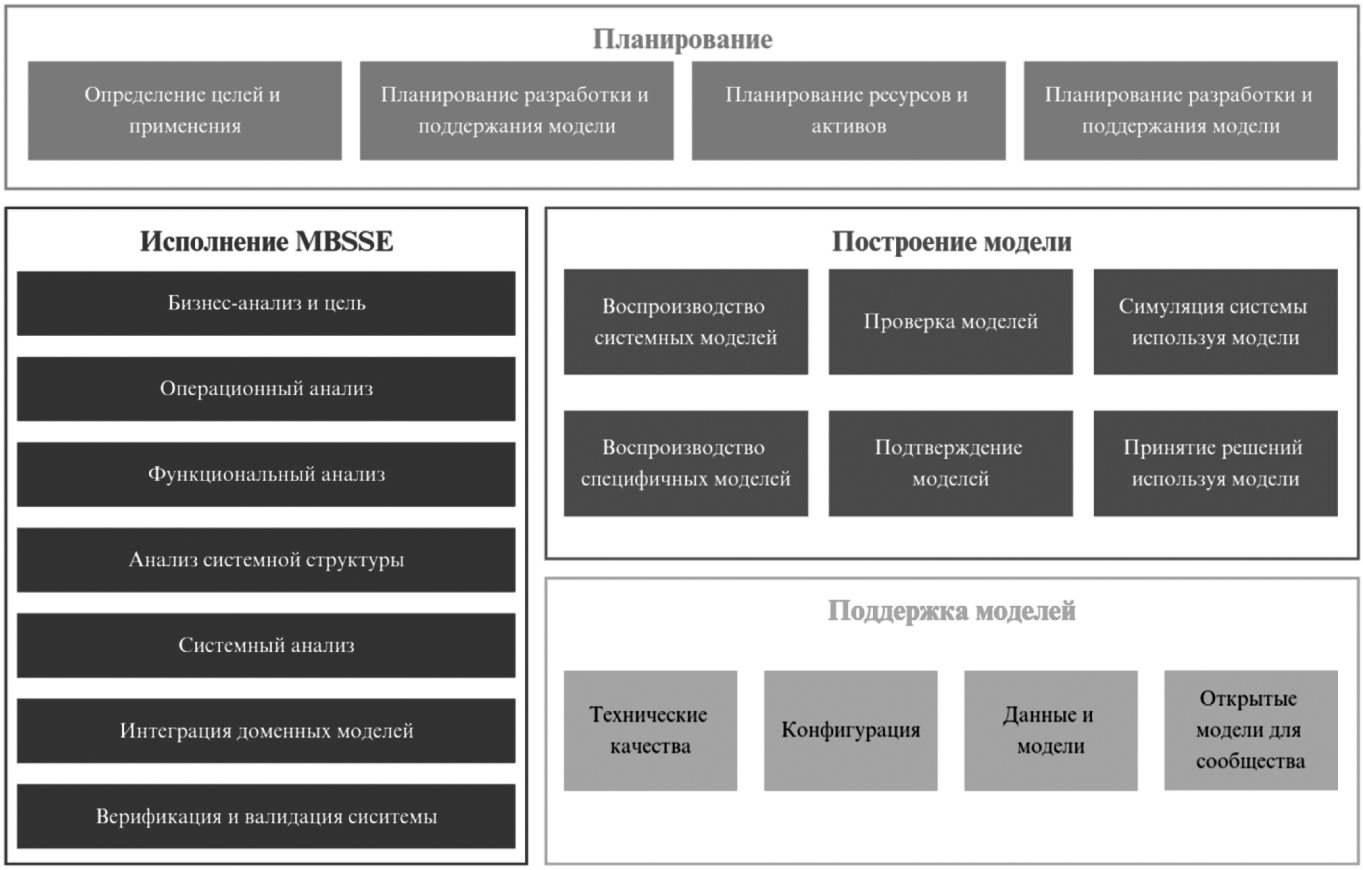


Рис. 2. Эталонная модель системы MBSSE ISO/IEC/IEEE 24641

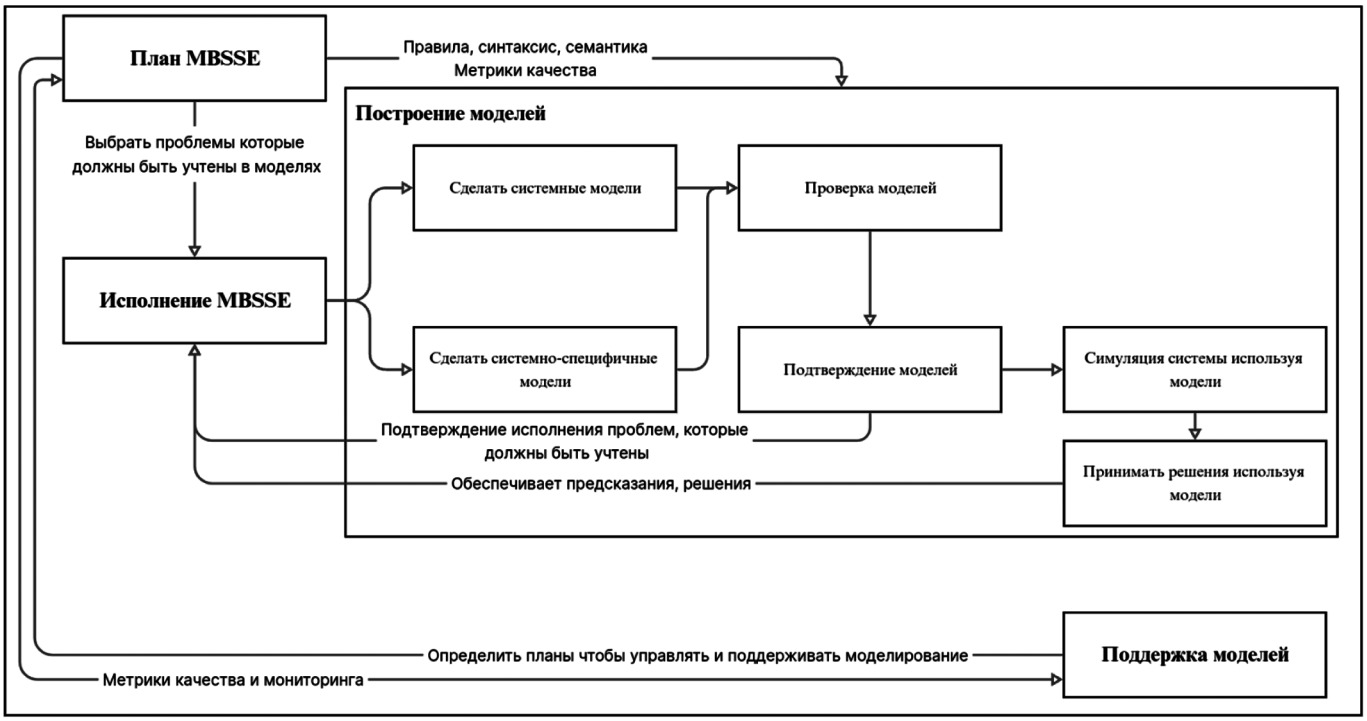


Рис. 3. Отношения между группами процессов MBSSE и процессами группы Построения моделей

Формализация архитектуры позволяет явно фиксировать принятые допущения и ограничения, а также анализировать последствия изменений до их реализации. Это особенно важно для производственных систем и наукоёмкой продукции, характеризующихся высокой степенью взаимосвязанности компонентов и участием различных заинтересованных сторон.

В то же время предложенный метод обладает рядом ограничений, которые необходимо учитывать при его практическом применении. Во-первых, эффективность метода в значительной степени зависит от уровня зрелости процессов системной инженерии в организации. Во-вторых, применение архитектурно-центричного подхода требует соответствующей квалификации специалистов, что может ограничивать использование метода на ранних этапах цифровой трансформации предприятий.

Дополнительным ограничением является то, что предложенный метод ориентирован на концептуальный и архитектурный уровни формализации и не рассматривает в явном виде вопросы количественной оценки эффективности архитектурных решений. Кроме того, в работе не проводится детальное сравнение различных инструментальных реализаций MBSE, включая языки и нотации, основанные на SysML, что ограничивает обобщаемость результатов с точки зрения программных средств.

Необходимо также отметить, что предложенный метод не претендует на универсальное решение всех задач формализации сложных технических систем. Его применение целесообразно в тех случаях, когда требуется систематизированное архитектурное описание и управление сложностью, однако для отдельных предметных областей могут потребоваться дополнительные методические расширения, учитывающие отраслевую специфику.

Заключение

В настоящей работе рассмотрена проблема формализации сложных технических систем в условиях роста сложности наукоёмкой продукции и ограничений традиционных документно-ориентированных подходов системной инженерии. Проведён анализ теоретических основ системной инженерии, понятия сложности и сложной технической системы, а также раскрыта роль модельно-ориентированной системной инженерии как современного метода управления сложностью. Показано, что использование формальных архитектурных моделей позволяет обеспечить целостное и согласованное представление системы на различных уровнях абстракции.

Научная значимость полученных результатов заключается в систематизации и развитии методических положений MBSE применительно к задаче формализации сложных технических систем. Работа вносит вклад в развитие архитектурно-центричного подхода в системной инженерии за счёт синтеза существующих теоретических положений и их структурирования в виде универсального метода формализации, ориентированного на управление сложностью и обеспечение согласованности инженерных решений.

К направлениям дальнейших исследований относятся разработка методов количественной оценки эффективности архитектурных решений, интеграция модельно-ориентированной системной инженерии с инструментами анализа и оптимизации, а также исследование вопросов масштабируемости и внедрения MBSE в условиях реальных промышленных проектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Friedenthal S., Moore A., Steiner R. A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language. — 3rd ed. — Waltham, MA: Morgan Kaufmann, 2014. — 626 p.
2. Madni A.M., Sievers M. Model-based systems engineering: Motivation, current status, and research opportunities // Systems Engineering. — 2018. — Vol. 21, № 3. — P. 172–190.
3. Holt J., Perry S. SysML for Systems Engineering. — 2nd ed. — London: The IET, 2013. — 304 p.
4. Боровков А.И. и др. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК // Оборонная техника. — 2018. — № 1. — С. 6–33.
5. INCOSE. Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities / ed. D.D. Walden et al. — 4th ed. — Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015. — 304 p.
6. Borgest N.M. Ontology-based approach to the complex technical system design // Information Technology and Nanotechnology (ITNT). — Samara: IEEE, 2017. — P. 132–136.
7. Kossiakoff A., Sweet W.N., Seymour S.J., Biemer S.M. Systems Engineering Principles and Practice. — 2nd ed. — Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011. — 528 p.
8. Boehm B. Software Engineering Economics. — Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1981. — 767 p.
9. Батоврин В.К. Системная инженерия, управление жизненным циклом и образование: о некоторых трендах // Управление большими системами: сборник трудов. — 2014. — № 48. — С. 25–48.

© Власов Артемий Андреевич (vlasov.aa@edu.spbstu.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.05

ЭРГОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОРМИРОВАНИЯ РЕКОМЕНДАЦИЙ В СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

ERGONOMIC ANALYSIS OF TEMPORAL CHARACTERISTICS OF RECOMMENDATION FORMATION IN INFORMATION PROCESSING SYSTEMS

B. Goryachkin
V. Andreev
P. Semkin

Summary. *Problem statement*. In the modern information space, the key parameter of the quality of «human-machine» interaction is the system response time. Delays in content generation in recommender systems directly affect user satisfaction and cognitive load.
Goal. To conduct an ergonomic analysis of the temporal characteristics of the recommendation formation process and identify the dependence of execution time on the architectural features of algorithms and the hardware platform.
Results. Mathematical models of recommendation formation time have been developed for three approaches: User-based Collaborative Filtering, Item-based Collaborative Filtering, and Matrix Factorization (SVD). The physical meaning of coefficients taking into account equipment characteristics is defined. The advantage of the matrix factorization method has been experimentally established.
Practical significance. The proposed calculation methodology and the findings allow predicting the performance of recommender systems and selecting the optimal algorithm to ensure ergonomic interaction standards in real time.

Keywords: Recommender systems, response time, ergonomics, User-based CF, Item-based CF, SVD, mathematical modeling, performance.

Горячкин Борис Сергеевич
кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
bsgor@mail.ru
Андреев Виктор Алексеевич
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
andreevva1@student.bmstu.ru
Семкин Петр Степанович
доцент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
semkin@bmstu.ru

Аннотация. *Постановка проблемы*. В современном информационном пространстве ключевым параметром качества взаимодействия «человек-машина» является время отклика системы. Задержки при формировании выдачи контента в рекомендательных системах напрямую влияют на удовлетворенность пользователя и когнитивную нагрузку.
Цель. Провести эргономический анализ временных характеристик процесса формирования рекомендаций и выявить зависимость времени выполнения от архитектурных особенностей алгоритмов и аппаратной платформы.
Результаты. Разработаны математические модели времени формирования рекомендаций для трех подходов: User-based Collaborative Filtering, Item-based Collaborative Filtering и Matrix Factorization (SVD). Определен физический смысл коэффициентов, учитывающих характеристики оборудования. Экспериментально установлено преимущество метода матричной факторизации.
Практическая значимость. Предложенная методика расчета и полученные выводы позволяют прогнозировать производительность рекомендательных систем и выбирать оптимальный алгоритм для обеспечения эргономических стандартов взаимодействия в реальном времени.

Ключевые слова: рекомендательные системы, время отклика, эргономика, User-based CF, Item-based CF, SVD, математическое моделирование, производительность.

Введение

В современном информационном пространстве пользователи сталкиваются с проблемой избыточности данных. Для эффективной навигации используются рекомендательные системы — программные комплексы, прогнозирующие предпочтения пользователей. С точки зрения эргономики информационных систем, время отклика является критически важной характеристикой. Задержки, превышающие порог комфортного восприятия, приводят к потере концентрации внимания и снижению эффективности работы.

Целью данной работы является эргономический анализ временных характеристик процесса формирования рекомендаций. Для этого необходимо рассмотреть общую схему работы алгоритмов, разработать математические модели для распространенных подходов (User-based Collaborative Filtering, Item-based Collaborative Filtering, Matrix Factorization) и верифицировать их экспериментально.

Предметная область и смежные исследования

Проблема проектирования рекомендательных систем является одной из центральных в современной науке о данных. Фундаментальные принципы работы алгоритмов коллаборативной фильтрации и матричной факторизации детально описаны в справочнике Ф. Риччи [4] и работе Ю. Лесковеца [5]. Авторы подробно разбирают математическую составляющую методов User-based и Item-based, а также подходы к снижению размерности (SVD). Однако, в указанных работах основной акцент делается на метриках точности предсказания (RMSE, Precision), в то время как вопросы временной эффективности рассматриваются поверхностно.

Для построения эргономической модели времени отклика необходимо учитывать не только алгоритмическую сложность, описанную в классическом труде Т. Кормена [6], но и физические ограничения аппаратной среды. Базовые принципы задержек в компьютерных сетях и модели передачи данных, используемые в данном исследовании, опираются на работы Дж. Куроуза [1]. Влияние архитектуры процессора, иерархии памяти и операционной системы на скорость выполнения операций моделируется на основе исследований В. Столлингса [7] и Э. Таненбаума [3]. Стандарты юзабилити и пределы психофизиологического восприятия определены в фундаментальных работах Я. Нильсена [12].

Особое внимание в работе уделено практическим аспектам реализации высоконагруженных приложений, рассмотренным М. Клеппманом [8]. Данные о системных задержках веб-фреймворков взяты из проекта TechEmpower [2], который приводит результаты тестов, проведенных на физическом оборудовании, что исключает погрешности виртуализации. Поскольку эксперимент проводится в среде Python/Django, критически важным источником стало исследование производительности Python М. Горелика [9], которое позволяет оценить накладные расходы интерпретатора и ORM. Вопросы эффективности управления динамической памятью и влияния современных аллокаторов на время выполнения операций рассмотрены в исследовании Д. Лейена [10]. Для низкоуровневой оценки стоимости машинных инструкций использованы справочные таблицы А. Фога [11].

Общая схема работы алгоритма

Процесс формирования рекомендаций представляет собой сложную последовательность операций, затрагивающую различные уровни архитектуры: от клиентского приложения до базы данных и вычислительного ядра. Общая схема работы, на основе которой строится моделирование, представлена на рис. 1.

Общая математическая модель

Время формирования рекомендаций моделируется как сумма трех независимых последовательных процессов:

$$T_{rec} = T_{net_req} + T_{gen} + T_{net_resp} \quad (1)$$

Где:

- T_{net_req} — время передачи запроса от клиента к серверу по сети.
- T_{gen} — время обработки запроса на генерацию рекомендаций на сервере.
- T_{net_resp} — время передачи ответа от сервера к клиенту по сети.

Сетевые задержки T_{net_req} и T_{net_resp} рассчитываются согласно классической модели коммутации пакетов как сумма латентности и времени передачи, зависящего от объема данных и пропускной способности [1].

$$T_{net_req} = L + \frac{S_{req}}{BW_{net}} \quad (2)$$

$$T_{net_resp} = L + \frac{S_{resp}}{BW_{net}} \quad (3)$$

Где:

- L — сетевая задержка.
- S_{req} (Request Size, бит) — размер пакета запроса.
- S_{resp} (Response Size, бит) — размер пакета ответа.
- BW_{net} (Bandwidth Network, бит/с) — пропускная способность канала.

Время обработки запроса на генерацию рекомендаций на сервере T_{gen} — это наиболее сложный компонент, зависящий от алгоритмической сложности рекомендательной модели и производительности оборудования. Оно декомпозируется на этапы:

$$T_{gen} = T_{const} + T_{train} + T_{fetch} + T_{calc} + T_{rank} + T_{content} \quad (4)$$

Системная задержка T_{const} — это фиксированная системная задержка веб-фреймворка. Значение параметра зависит от типа среды выполнения и подтверждается результатами сравнительных тестов производительности веб-фреймворков [2]. Интерпретация байт-кода в динамических языках создает накладные расходы по сравнению с прямым исполнением машинных инструкций [3]. Для теоретических расчетов принимаются значения, соответствующие показателям задержки из независимых тестов:

- Для систем на базе интерпретируемых языков (Python/Django, Flask): согласно бенчмаркам, средняя задержка составляет 1.5–3 мс. Для расчетов принимается значение T_{const} = 2 мс.

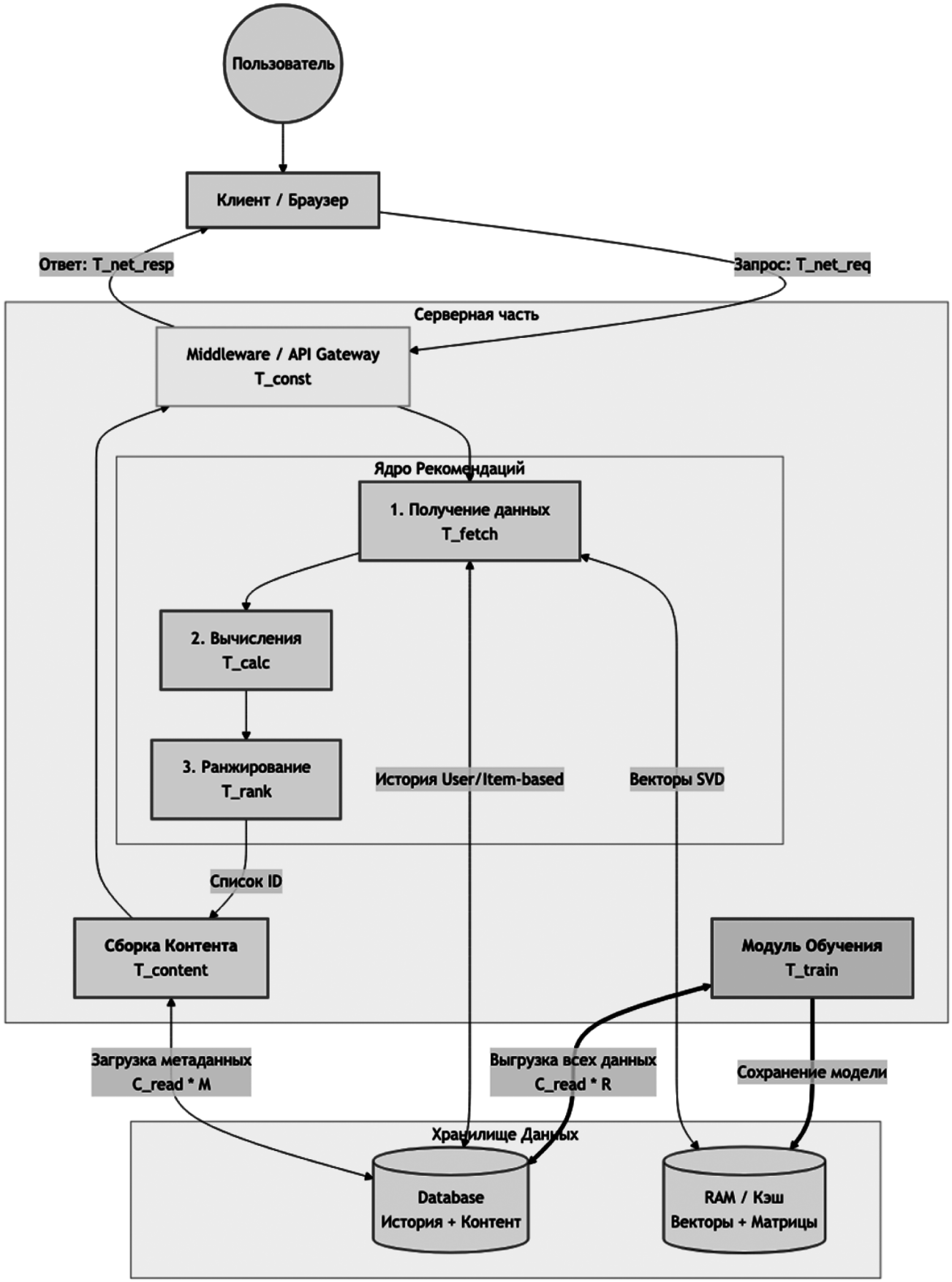


Рис. 1. Общая схема работы алгоритма формирования рекомендаций

— Для высокопроизводительных систем (FastHTTP, C++): средняя задержка составляет 0.2–0.5 мс. Для расчетов принимается значение T_{const} = 0.2 мс.

Для получения точного значения в конкретной реализации необходимо провести инструментальный замер времени отклика конечной точки API без бизнес-логики.

Параметры T_{train}, T_{fetch}, T_{calc}, T_{rank}, $T_{content}$ зависят от подхода к созданию рекомендательных систем. Будет проведен расчет этапов при использовании трех подходов:
— User-based Collaborative Filtering
— Item-based Collaborative Filtering
— Matrix Factorization (SVD)

Анализ моделей рекомендательных систем

Модель User-based Collaborative Filtering

В подходе User-based Collaborative Filtering (Memory-based) система ищет пользователей с похожими предпочтениями непосредственно в момент запроса. Это требует обращения ко всей истории взаимодействий, хранящейся в базе данных, и вычисления матрицы сходства между текущим пользователем и всеми остальными пользователями системы в реальном времени [4].

Обучение модели (T_{train}): Поскольку данный алгоритм относится к классу «ленивого обучения», этап предварительного построения глобальной модели отсутствует. Система хранит данные в исходном виде и выполняет вычисления только при поступлении запроса, что исключает затраты времени на предварительную тренировку [4].

$$T_{train} = 0 \tag{5}$$

Получение истории (T_{fetch}): Выборка полной истории взаимодействий всех пользователей из базы данных. Время выполнения моделируется как сумма фиксированной задержки на инициализацию транзакции и времени передачи данных, линейно зависящего от общего количества записей взаимодействий. Необходимость загрузки полного набора данных обусловлена природой алгоритма k-NN [5].

$$T_{fetch} = C_{read} \times R + T_{db_lat} \tag{6}$$

Вычисления (T_{calc}): Расчет вектора сходства. Необходимо вычислить метрику близости между вектором текущего пользователя и векторами всех остальных пользователей. Наиболее распространенными мерами близости являются косинусное сходство (Cosine Similarity) или корреляция Пирсона. Вычисление сходства двух пользователей требует прохода по всем объектам (длиной l), которые они оценили [5].

$$T_{calc} = C_{math} \times \left(U \times I\right) \tag{7}$$

Ранжирование (T_{rank}): В данном алгоритме этот этап является составным. Сначала производится сортировка пользователей для выбора k «ближайших соседей». Затем производится агрегация их истории взаимодействий (сбор кандидатов) и сортировка получившегося списка товаров для выбора Топ-M рекомендаций [6].

$$T_{rank} = C_{sort} \times \left(U \times \log_2 k\right) + \\ + C_{math} \times \left(k \times H_u\right) + C_{sort} \times \left(k \times H_u \times \log_2 M\right) \tag{8}$$

Подготовка контента ($T_{content}$): Выборка из базы данных метаинформации для M объектов. Операция включает накладные расходы на планирование SQL-запроса и сетевое взаимодействие, а также время непосредственного чтения данных [8].

$$T_{content} = C_{read} \times M + T_{db_lat} \tag{9}$$

Где:
— R — количество записей взаимодействий (лайков) в БД.
— U — количество пользователей.
— I — количество объектов (постов).
— k — количество ближайших соседей.
— H_u — средняя длина истории одного соседа.
— M — количество запрашиваемых рекомендаций.
— T_{db_lat} — фиксированная задержка СУБД. Характеризует суммарное время, затрачиваемое на установление сетевого соединения, парсинг SQL-запроса, планирование выполнения и инициализацию транзакции. Для удаленных серверов (WAN): 20–100 мс. Для локальных соединений (LAN/Localhost) с использованием ORM: 5–15 мс [8]. Для теоретических расчетов принимается T_{db_lat} = 10 мс.
— C_{read} — коэффициент эффективности работы с данными.
— C_{math} — коэффициент вычислительной эффективности.
— C_{sort} — коэффициент эффективности алгоритма сортировки.

Модель Item-based Collaborative Filtering

В случае использования алгоритма Item-based Collaborative Filtering процесс формирования рекомендаций рассматривается как совокупность этапа построения модели и этапа инференса. Модель представляет собой матрицу сходства объектов (Items Similarity Matrix), которая должна быть рассчитана на основе всей истории взаимодействий. Полное время генерации включает затраты на построение этой матрицы, а также онлайн-обработку запроса, сводящуюся к взвешиванию истории действий конкретного пользователя [4].

Обучение модели (T_{train}): Полный цикл обновления модели. Включает в себя время на выгрузку всего набора данных из базы в оперативную память и время на расчет матрицы сходства объектов (Item Similarity Matrix) размером $I \times I$. Данный этап выполняется в режиме Offline и требует попарного сравнения векторов взаимодействий всех объектов по всей базе пользователей. С точки зрения линейной алгебры, этот процесс эквивалентен умножению разреженной матрицы взаимодействий на её транспонированную копию, что имеет высокую вычислительную сложность [5].

$$T_{train} = C_{read} \times R + T_{db_lat} + C_{train_mat} \times \left(I^2 \times U\right) \quad (10)$$

Получение истории (T_{fetch}): Запрос к базе данных для получения списка объектов, с которыми взаимодействовал конкретный пользователь. Время выполнения включает фиксированную системную задержку СУБД и переменную составляющую, зависящую от длины истории пользователя [8].

$$T_{fetch} = C_{read} \times H_u + T_{db_lat} \quad (11)$$

Вычисления (T_{calc}): Агрегация векторов сходства. Для каждого объекта из истории пользователя необходимо сложить соответствующие вектора из матрицы сходства. В процессе инференса система прогнозирует рейтинг для целевого товара как взвешенную сумму оценок, поставленных пользователем похожим товарам. Алгоритмически это сводится к умножению вектора истории пользователя на матрицу сходства, что позволяет получить предсказания сразу для всех объектов [4].

$$T_{calc} = C_{math} \times \left(H_u \times I\right) \quad (12)$$

Ранжирование (T_{rank}): Процесс выбора M объектов с наибольшим предсказанным рейтингом. Вместо полной сортировки массива используется алгоритм частичной сортировки, что позволяет существенно снизить вычислительную сложность [6].

$$T_{rank} = C_{sort} \times \left(I \times \log_2 M\right) \quad (13)$$

Подготовка контента ($T_{content}$): Выборка из базы данных метаинформации для M объектов, отобранных на этапе ранжирования [8].

$$T_{content} = C_{read} \times M + T_{db_lat} \quad (14)$$

Где:

- H_u — количество объектов в истории взаимодействий текущего пользователя (длина профиля).
- I — общее количество объектов (постов) в системе.
- M — количество запрашиваемых рекомендаций.
- T_{db_lat} — фиксированная задержка СУБД. Характеризует суммарное время, затрачиваемое на установление сетевого соединения, парсинг SQL-запроса, планирование выполнения и инициализацию транзакции. Для удаленных серверов (WAN): 20–100 мс. Для локальных соединений (LAN/Localhost) с использованием ORM: 5–15 мс [8]. Для теоретических расчетов принимается T_{db_lat} = 10 мс.
- C_{train_mat} — коэффициент эффективности построения матрицы сходства.
- C_{read} — коэффициент скорости чтения данных.
- C_{math} — коэффициент вычислительной эффективности.
- C_{sort} — коэффициент эффективности алгоритма сортировки.

Модель Matrix Factorization (SVD)

В архитектуре матричной факторизации (SVD, ALS) профили пользователей и свойства объектов сжимаются в компактные векторы латентных факторов фиксированной длины. Рассматриваемый процесс генерации рекомендаций включает этап обучения модели — итеративное разложение матрицы взаимодействий для получения векторов факторов, и этап инференса — вычисление предсказаний через операции линейной алгебры в оперативной памяти без прямого обращения к базе данных [4].

Обучение модели (T_{train}): Полный цикл обучения. Состоит из выгрузки обучающей выборки (всех взаимодействий) и итеративного процесса обучения. Процесс требует многократного прохода по всем имеющимся данным для минимизации ошибки. В случае использования алгоритма SGD, для каждого из R известных рейтингов система вычисляет градиент ошибки и обновляет соответствующие K параметров векторов пользователя и товара. Этот процесс повторяется E раз (эпох) до сходимости алгоритма [5].

$$T_{train} = C_{read} \times R + T_{db_lat} + C_{learn} \times \left(E \times R \times K\right) \quad (15)$$

Получение вектора (T_{fetch}): Извлечение вектора латентных факторов текущего пользователя из оперативной памяти. Время выполнения определяется скоростью копирования данных вектора из RAM в кэш процессора [7].

$$T_{fetch} = C_{read_ram} \times K \quad (16)$$

Вычисления (C_{math}): Вычисление предсказанных рейтингов. Производится операция матричного умножения вектора пользователя на матрицу факторов объектов [4].

$$T_{calc} = C_{math} \times (I \times K) \quad (17)$$

Ранжирование (T_{rank}): Процесс выбора M объектов с наибольшим предсказанным рейтингом. Вместо полной сортировки массива используется алгоритм частичной сортировки, что позволяет существенно снизить вычислительную сложность [6].

$$T_{rank} = C_{sort} \times (I \times \log_2 M) \quad (18)$$

Подготовка контента ($T_{content}$): Выборка из базы данных метаинформации для M объектов, отобранных на этапе ранжирования [8].

$$T_{content} = C_{read} \times M + T_{db_lat} \quad (19)$$

Где:

— E — количество эпох (итераций) обучения модели.
— R — количество записей взаимодействий (лайков) в БД.
— K — количество латентных факторов (размерность вектора, константа модели).
— I — общее количество объектов (постов) в системе.
— M — количество запрашиваемых рекомендаций.
— T_{db_lat} — фиксированная задержка СУБД. Характеризует суммарное время, затрачиваемое на установление сетевого соединения, парсинг SQL-запроса, планирование выполнения и инициализацию транзакции. Для удаленных серверов (WAN): 20–100 мс. Для локальных соединений (LAN/Localhost) с использованием ORM: 5–15 мс [8]. Для теоретических расчетов принимается T_{db_lat} = 10 мс.
— C_{learn} — коэффициент скорости обучения.
— C_{read} — коэффициент скорости чтения данных.
— C_{read_ram} — коэффициент скорости чтения данных из оперативной памяти.
— C_{math} — коэффициент вычислительной эффективности.
— C_{sort} — коэффициент эффективности алгоритма сортировки.

Физический смысл и расчет коэффициентов

Коэффициенты C в формулах определяются из физических характеристик сервера (CPU, RAM) и накладных расходов программной платформы.

Коэффициент чтения данных (C_{read})

Характеризует время, затрачиваемое на извлечение одной записи из БД и превращение её в объект в оперативной памяти. Процесс чтения данных не является атомарной операцией, а представляет собой последовательность действий на разных уровнях компьютерной системы. На аппаратном уровне происходит перенос данных по шине памяти, время которого зависит от пропускной способности канала [7]. На уровне операционной системы и среды выполнения происходит управление динамической памятью и создание экземпляров объектов [3]. На прикладном уровне, при использовании ORM-библиотек, добавляются накладные расходы на преобразование реляционных данных в объектную модель, которые выступают мультипликатором базовых задержек [8].

$$C_{read} = \left(\frac{S_{row}}{BW_{RAM}} + T_{alloc} \right) \times K_{ORM} \quad (20)$$

Где:

— S_{row} — размер одной строки данных.
— BW_{RAM} — пропускная способность оперативной памяти, является технической характеристикой используемого серверного оборудования.
— T_{alloc} (Allocation Time) — среднее время выделения памяти и инициализации одного объекта. Значение фундаментально различается для языков с автоматическим управлением памятью (Python/Java) и языков с ручным управлением (C++/Rust).
- Для Python: Создание объекта требует обращения к C-API для аллокации структуры PyObject и инициализации счетчика ссылок. Согласно профилированию, это занимает 200–400 нс [9]. Принимается T_{alloc} = 300 нс.
- Для C++: Согласно исследованию производительности аллокаторов памяти, время выделения динамической памяти в современных библиотеках составляет в среднем 20–30 нс. Выделение памяти на стеке занимает менее 1 нс [10]. Для обобщенных расчетов принимается T_{alloc} = 20 нс.

— K_{ORM} — коэффициент накладных расходов ORM. Показывает отношение производительности «чистых» запросов к запросам через ORM [2].
- Для тяжелых ORM (Django/Hibernate): накладные расходы на рефлексию велики. Принимается K_{ORM} = 40.
- Для пакетной обработки (Pandas/Bulk Read): При использовании методов выгрузки словарей и инициализации DataFrame накладные расходы снижаются за счет амортизации затрат на группу записей, но остаются существенными из-за динамической типизации. Принимается K_{ORM} = 20.
- Для легковесных (Raw SQL): накладные расходы минимальны. Принимается K_{ORM} = 1.5.

Коэффициент чтения из памяти (C_{read_ram})

Характеризует время доступа к данным, уже находящимся в оперативной памяти, таким как векторам

латентных факторов, без участия СУБД и ORM. Используется в моделях, работающих с предзагруженными данными (SVD). Время передачи блока данных через канал (в данном случае — шину памяти) прямо пропорционально размеру блока и обратно пропорционально ширине полосы пропускания [7].

$$C_{read_ram} = \frac{S_{element}}{BW_{RAM}} \quad (21)$$

Где:

— $S_{element}$ — размер одного элемента данных.

— BW_{RAM} — пропускная способность оперативной памяти, является технической характеристикой используемого серверного оборудования.

Коэффициент вычислений (C_{math})

Характеризует время выполнения одной элементарной математической операции (например, умножение двух чисел с плавающей точкой). Выводится из определения теоретической пиковой производительности процессора (Peak Performance), которая рассчитывается как произведение тактовой частоты на количество инструкций, выполняемых за такт. Коэффициент K_{lib} вводится для учета программной неэффективности среды выполнения относительно аппаратного предела [7].

$$C_{math} = \frac{1}{f_{CPU} \times N_{OPS}} \times K_{lib} \quad (22)$$

Где:

— f_{CPU} — тактовая частота процессора (Гц). Техническая характеристика оборудования.

— N_{OPS} — количество операций с плавающей точкой, выполняемых за один такт (FLOPS/cycle). Зависит от поддержки процессором векторных инструкций (SIMD). В современной архитектуре x86-64 (при использовании наборов инструкций AVX2) процессор может обрабатывать 8 чисел одинарной точности (float32) одновременно [7].

— K_{lib} — коэффициент эффективности библиотеки. Характеризует накладные расходы языка программирования.

- Для чистого Python: Из-за динамической типизации и работы интерпретатора каждая математическая операция требует распаковки объектов, проверки типов и вызова соответствующих C-функций. Согласно бенчмаркам, выполнение цикла математических операций на чистом Python происходит в 50–100 раз медленнее, чем на C/C++ [9]. Принимается $K_{lib} = 80$.
- Для оптимизированных библиотек (NumPy/BLAS): Библиотека делегирует вычисления низкоуровневым процедурам на C/Fortran (библиотеки MKL/OpenBLAS), использующим векторные инструкции процессора. Как показано в сравнительных тестах, при работе с большими массивами данных накладные расходы Python-обертки нивелируются, и эффективность приближается к нативному коду [9]. Принимается $K_{lib} = 1.5$.

Коэффициент сортировки (C_{sort})

Характеризует усредненное время, затрачиваемое на одну операцию сравнения двух элементов и перестановку указателей в памяти при ранжировании. Время работы алгоритма сортировки физически складывается из совокупности атомарных операций сравнения и переходов [6].

$$C_{sort} = \frac{Ops_{compare}}{f_{CPU}} \times K_{lang} \quad (23)$$

Где:

— $Ops_{compare}$ — количество процессорных тактов, необходимых для сравнения двух чисел. Согласно таблицам инструкций современных архитектур, операция сравнения имеет латентность 1 такт, а операция условного перехода — 1–2 такта при корректном предсказании ветвлений [11]. Для расчетов принимается $Ops_{compare} = 2$.

— f_{CPU} — тактовая частота процессора.

— K_{lang} — коэффициент языка программирования. Отражает степень оптимизации кода относительно машинных инструкций.

- Для компилируемых языков (C++): Компилятор применяет оптимизацию «встраивания», заменяя вызов функции сравнения на прямые инструкции процессора. Накладные расходы возникают только из-за задержек доступа к регистрам и кэшу, описанных в руководствах по оптимизации [11]. Принимается $K_{lang} = 1.5$.
- Для интерпретируемых языков (Python): Сравнение объектов требует вызова методов, проверки типов и обработки ссылок. Накладные расходы интерпретатора замедляют выполнение операций в 20–50 раз по сравнению с нативным кодом [9]. Принимается $K_{lang} = 30$.

Коэффициент построения матрицы (C_{train_mat})

Характеризует эффективность операций линейной алгебры при перемножении больших матриц в ходе офлайн-обучения Item-based модели. Фактически отражает обратную величину реальной производительности системы.

Формула основана на метрике эффективности использования вычислительных ресурсов (HPC Efficiency). Время выполнения задачи определяется теоретическим потолком производительности оборудования, скорректированным на коэффициент утилизации [9].

$$C_{train_mat} = \frac{1}{FLOPS_{peak} \times Efficiency} \quad (24)$$

Где:

— $FLOPS_{peak}$ — пиковая производительность процессора (количество операций с плавающей точкой в секунду). Является паспортной характеристикой процессора [7].

— *Efficiency* — коэффициент эффективности использования кэша и векторизации при работе с большими массивами. Показывает, какую часть от теоретической мощности процессора реально утилизирует алгоритм.

- Для оптимизированных библиотек (NumPy + MKL/OpenBLAS): Реализуют стандарт BLAS Level 3 (General Matrix Multiply — GEMM). Благодаря техникам блочного доступа к памяти (cache blocking) и векторизации, эти библиотеки минимизируют простои процессора при ожидании данных из памяти. Эффективность достигает 0.7–0.9 (70–90 % от пика) [9]. Принимается *Efficiency* = 0.8.
- Для нативных реализаций (чистый цикл): Обычное перемножение матриц («три вложенных цикла») не учитывает иерархию кэш-памяти, что приводит к постоянным промахам кэша (cache miss). Эффективность падает до <0.05 (менее 5 % от мощности процессора) [9]. Принимается *Efficiency* = 0.05.

Коэффициент скорости обучения (C_{learn})

Характеризует время обработки одного фактора (в векторе длиной K) для одной записи взаимодействия (из R) в рамках одной итерации (из E) алгоритма стохастического градиентного спуска (SGD). Выводится из оценки вычислительной сложности шага обновления градиента. Время выполнения одной итерации определяется количеством атомарных инструкций процессора, деленным на его частоту, с поправкой на накладные расходы среды выполнения [7].

$$C_{learn} = \frac{Ops_{step}}{f_{CPU}} \times K_{lang} \quad (25)$$

Где:

— Ops_{step} — количество арифметических операций, необходимых для обновления одного веса в векторе латентных факторов. Алгоритм SGD [4] подразумевает вычисление ошибки (вычитание), умножение на скорость обучения (learning rate) и обновление веса (сложение). С точки зрения процессора, это цепочка инструкций загрузки из памяти, FMA (Fused Multiply-Add) и записи обратно. Согласно таблицам латентности [11], с учетом доступа к L1-кэшу это занимает порядка 8–12 тактов. Для расчетов принимается $Ops_{step} = 10$.

— f_{CPU} — тактовая частота процессора.

— K_{lang} — коэффициент накладных расходов языка программирования и среды выполнения. Показывает, во сколько раз выполнение арифметических операций в конкретной программной среде медленнее, чем исполнение идеального машинного кода.

- Для компилируемых языков (C++, Rust): Компилятор векторизует цикл обучения (SIMD), сводя накладные расходы к минимуму [9]. Принимается $K_{lang} = 1.5$.
- Для интерпретируемых языков (Чистый Python): Поскольку цикл обучения SGD является «плотным» и выполняется миллиарды раз, интерпретатор Python вносит колоссальные задержки на каждой итерации. Согласно профилированию, чистый Python в таких задачах медленнее C++ в 50–100 раз [9]. Принимается $K_{lang} = 80$.

Экспериментальное исследование

Методика проведения

Экспериментальное исследование проводилось на локальном аппаратном комплексе (CPU Apple M1, 8 ГБ RAM), исключающем влияние внешней сети. Программная среда: Python/Django, PostgreSQL.

Была сформирована синтетическая база данных: количество пользователей U=1000, объектов I=2000, взаимодействий R=20000.

Сценарий включал серию из 20 замеров времени формирования M=10 рекомендаций для каждого алгоритма после прогрева кэша. Измерение производилось методом инструментального профилирования кода на сервере.

Результаты

Для оценки точности моделей произведено сопоставление теоретических расчетных данных и экспериментальных результатов. Сводные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Сравнительный анализ и оценка погрешности моделей

Модель	$T_{теор}$, мс	$T_{эксп}$, мс	Абс. разность, мс	Погрешность
User-based CF	142.2	175.3	33.1	18.9 %
Item-based CF	22.2	38.6	16.4	42.5 %
SVD	12.1	25.8	13.7	53.1 %

Результаты сопоставления эффективности алгоритмов и оценки точности модели отображены на рис. 2.

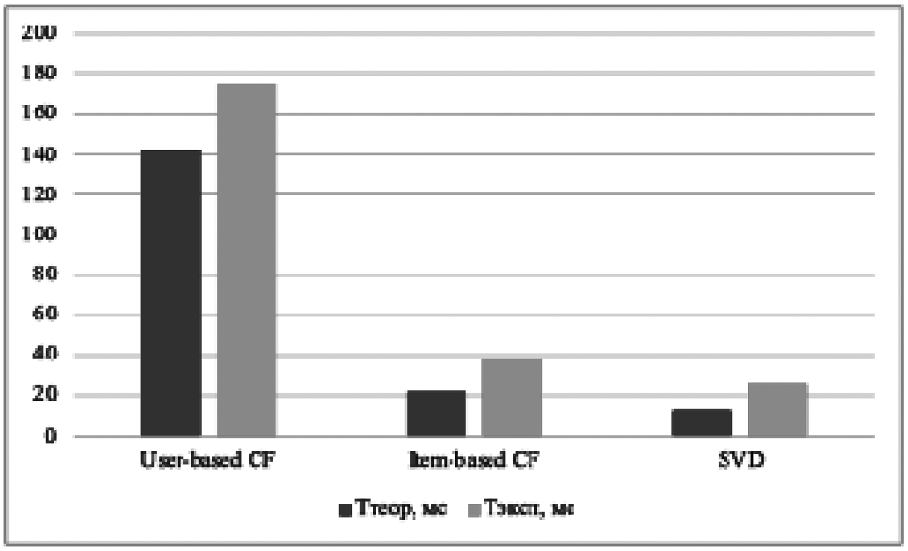


Рис. 2. Сопоставление результатов расчетного и экспериментального времени формирования рекомендаций

Для наиболее ресурсоемкого алгоритма (User-based CF) теоретическая модель показала высокую точность, погрешность составила менее 19 %. Для быстродействующих алгоритмов (Item-based и SVD) наблюдается более высокая относительная погрешность, обусловленная стохастической природой системных задержек (планирование потоков, промахи кэша), которые вносят фиксированную прибавку порядка 13–16 мс.

Заключение

В ходе работы был проведен эргономический анализ параметра «Время формирования рекомендаций». Разработанная математическая модель адекватно описывает зависимость производительности от объема данных и архитектурных характеристик оборудования, показав высокую точность прогнозирования для ресурсоемких алгоритмов.

Экспериментально установлено существенное преимущество метода матричной факторизации (SVD). Время генерации рекомендаций для SVD составило в среднем 25.8 мс, что в 6.8 раза быстрее классического подхода User-based CF (175.3 мс).

С точки зрения эргономики информационных систем, полученная разница является критической, поскольку алгоритм User-based CF (175.3 мс) уже на этапе серверных вычислений превышает лимит времени отклика для сохранения у пользователя ощущения мгновенной реакции системы, который составляет 100 мс [12]. С учетом неизбежных сетевых задержек и времени отрисовки интерфейса браузером, суммарное ожидание пользователя выйдет за пределы комфортного восприятия, что приведет к снижению качества взаимодействия. В то же время метод SVD (25.8 мс) обеспечивает четырехкратный запас производительности относительно допустимого максимума, что позволяет компенсировать задержки на передачу данных по сети и обеспечить комфортное восприятие для пользователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куроуз Дж., Росс К. Компьютерные сети. Нисходящий подход. — 6-е изд. — М.: Э, 2016. — 907 с.
2. TechEmpower. Web Framework Benchmarks. Round 21: электронный ресурс. — URL: https://www.techempower.com/benchmarks/ (дата обращения: 29.12.2025).
3. Таненбаум Э., Бос Х. Современные операционные системы. — 4-е изд. — СПб.: Питер, 2015. — 1120 с.
4. Ricci F., Rokach L., Shapira B. Recommender Systems Handbook. — 3rd ed. — Cham: Springer, 2022. — 1053 p.
5. Лесковец Ю., Раджараман А., Ульман Дж. Анализ больших данных. — М.: ДМК Пресс, 2016. — 498 с.
6. Кормен Т.Х., Лейзерсон Ч.Э., Ривест Р.Л., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. — 3-е изд. — М.: Вильямс, 2013. — 1328 с.
7. Столлингс В. Структурная организация и архитектура компьютерных систем. — 9-е изд. — М.: Вильямс, 2022. — 1266 с.
8. Клеппман М. Высоконагруженные приложения. Программирование, масштабирование, поддержка. — СПб.: Питер, 2018. — 640 с.
9. Gorelick M., Ozsvald I. High Performance Python: Practical Performant Programming for Humans. — 2nd ed. — O'Reilly Media, 2020. — 468 p.
10. Leijen D., Zorn B. G., De Moura L. Mimalloc: Free List Sharding in Action. — Microsoft Research, 2019. — 22 p.
11. Fog A. Instruction tables: Lists of instruction latencies, throughputs and micro-operation breakdowns for Intel, AMD, and VIA CPUs. — Agner Fog, 2025. — 485 p.
12. Nielsen J. Usability Engineering. — San Diego: Morgan Kaufmann, 1993. — 346 p.

© Горячкин Борис Сергеевич (bsgor@mail.ru); Андреев Виктор Алексеевич (andreevva1@student.bmstu.ru);
Семкин Петр Степанович (semkin@bmstu.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.06

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ФИНАНСАХ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ОПЕРАТОРОВ И ФИЗИЧЕСКИ-ИНФОРМИРОВАННОГО ОБУЧЕНИЯ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

MATHEMATICAL MODELING OF STOCHASTIC DYNAMICAL SYSTEMS IN FINANCE BASED ON NEURAL OPERATORS AND PHYSICS-INFORMED LEARNING: AN ANALYTICAL REVIEW

E. Dzhalmukhambetova
M. Kartashov
E. Syachina
A. Toshpulotov

Summary. A systematic analysis of machine learning approaches for solving SDEs in quantitative finance is conducted. The study compares classical numerical methods, physics-informed neural networks (PINNs), and operator architectures (DeepONet, FNO). It is established that neural operators overcome the «curse of dimensionality», providing multi-order computational acceleration for calibration and pricing tasks in dimensions $d > 50$. Key limitations are identified: the retraining intensity of PINNs and the high data dependency of operator methods. The study substantiates the effectiveness of hybrid physics-informed neural operators (PINO) for multi-asset portfolio risk management, as they combine high-speed inference with the physical consistency of the model.

Keywords: neural network operators, physics-informed neural networks, stochastic differential equations, derivative pricing, curse of dimensionality, model calibration, quantitative finance.

Джалмухамбетова Елена Азатуллаевна
кандидат физико-математических наук,
Каспийский институт морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф.М. Апраксина филиал,
ФГБОУ ВО Волжский государственный университет водного транспорта, г. Астрахань
elena_jalm@mail.ru
Карташов Максим Вячеславович
доцент, Каспийский институт морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф.М. Апраксина филиал,
ФГБОУ ВО Волжский государственный университет водного транспорта, г. Астрахань
Сячина Евгения Ильинична
старший преподаватель,
ФГБОУ ВО Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева, г. Астрахань
eanyushina@yandex.ru
Тошпулотов Алишер Аминович
PhD в области Бизнеса и Экономики, доцент,
Европейский Международный Университет,
Технологический Университет Таджикистана,
г. Душанбе, Таджикистан
a.toshpulotov@yandex.com

Аннотация. Проведен систематический анализ подходов машинного обучения к решению СДУ в количественных финансах. Сравниваются классические численные методы, физически-информированные нейронные сети (PINNs) и операторные архитектуры (DeepONet, FNO). Установлено, что нейросетевые операторы преодолевают «проклятие размерности», обеспечивая ускорение вычислений на несколько порядков в задачах калибровки и ценообразования при $d > 50$. Определены ключевые ограничения: трудоемкость переобучения PINNs и высокая потребность операторов в данных. Обоснована эффективность гибридных физически-информированных операторов (PINO) для риск-менеджмента мульти-ассетных портфелей, сочетающих высокую скорость инференса с физической строгостью модели.

Ключевые слова: нейросетевые операторы, физически-информированные нейронные сети, стохастические дифференциальные уравнения, ценообразование деривативов, проклятие размерности, калибровка моделей, количественные финансы.

Введение

Проблема «проклятия размерности» остается фундаментальным барьером для классических методов решения СДУ в количественных финансах. Сложность методов Монте-Карло растет экспоненциально $O\left(\mu^{-2-d}\right)$, что ограничивает анализ мульти-ассетных и траекторно-зависимых деривативов. Современный рынок требует устойчивой калибровки с оценкой эпистемической неопределенности и гарантией физической согласованности прогнозов.

Эволюция подходов ознаменовала переход от сеточных схем к физически-информированным нейронным сетям (PINNs) и нейросетевым операторам. Эта смена парадигмы — от поиска единичного решения к изучению отображений между функциональными пространствами — систематизирована Karniadakis et al. [1]. Методология PINNs, заложенная Raissi et al. [2], позволила интегрировать дифференциальные операторы в функцию потерь через автоматическое дифференцирование. Параллельно подход Han et al. [3] на базе глубоких обратных СДУ (deep BSDE) обеспечил решение уравнений Гамильтона-Якоби-Беллмана в размерностях свыше 100. Настоящая статья систематизирует данные подходы, проводя сравнительный анализ их эффективности и перспектив гибридизации для моделирования стохастических систем.

Результаты

Несмотря на многолетнее развитие вычислительной финансовой математики, классические методы решения дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) для ценообразования деривативов сталкиваются с принципиальными ограничениями, становящимися критическими в многомерных задачах. Методы Монте-Карло, занимающие центральное место в практике благодаря универсальности, ограничены теоретической сложностью $O\left(\mu^{-2-d}\right)$, где ε — точность, а d — размерность. Данное «проклятие размерности» делает их неэффективными для многомерных американских опционов при $d>10$. При этом работа с зависимыми от траектории (path-dependent) контрактами осложняется марковской природой симуляций, а модификации вроде методов регрессии Лонгстаффа-Шварца вносят дополнительную аппроксимационную ошибку. Параллельно с этим конечно-разностные методы (FDM) сталкиваются с проблемой жёсткости (stiffness) систем и сеточной зависимостью, что затрудняет генерацию качественных сеток для сложных геометрий. Особенно остро стоит проблема обработки свободных границ для американских опционов; в многомерном случае ($d>2$) построение адаптивных сеток практически неосуществимо. Как отмечают Gatta et al. [4], даже методы конечных элементов (FEM), несмотря на вариационную формулировку, сохраняют зависимость от сеточной структуры и демонстрируют экспоненциальный рост числа степеней свободы. Дополнительные трудности возникают в обратных задачах калибровки (например, моделей Хестона), которые являются некорректно поставленными в смысле Адамара: их решения неустойчивы к шуму, а классическая оптимизация страдает от многоэкстремальности функционала.

Переход к нейросетевым методам базируется на теореме универсальной аппроксимации, легитимизирующей использование нейросетей для оценки функций цены опционов [4], и технологии автоматического дифференцирования, позволяющей вычислять чувствительности (Greeks) с машинной точностью без ошибок дискретизации. Это создает базу для развития физически-информированных и операторных подходов.

Методология PINNs трансформирует ценообразование в задачу минимизации невязки дифференциального оператора. В отличие от чисто эмпирических моделей, PINNs встраивают фундаментальные финансовые законы непосредственно в функцию потерь через автоматическое дифференцирование, обеспечивая физическую согласованность решений на уровне архитектуры сети.

Математическая формализация PINNs для ценообразования опционов базируется на параметризации ценовой функции нейронной сетью $\hat{V}_\theta(S,t)$, где — обучаемые параметры (веса и смещения), S — цена базового актива, а t — время. Согласно Kazemian et al. [5], аппроксимация решения уравнения Блэка-Шоулза достигается минимизацией композитной функции потерь, включающей три фундаментальных компонента: невязку уравнения в частных производных (PDE), начальные условия (payoff) и граничные условия.

Операторная невязка для европейских опционов формулируется через дифференциальный оператор $\mathcal{N}$:

$$\mathcal{L}_{\mathcal{PDE}} = \frac{1}{N_{col}}\sum_{i=1}^{N_{col}}\left|\frac{\partial\widehat{V_\theta}}{\partial t} + \frac{1}{2}\tilde{A}^2S_i^2\frac{\partial^2\widehat{V_\theta}}{\partial S^2} + rS_i\frac{\partial\widehat{V_\theta}}{\partial S} - r\widehat{V_\theta}\right|^2$$

где все частные производные вычисляются с использованием автоматического дифференцирования, что исключает ошибки дискретизации, характерные для сеточных методов.

Полная функция потерь представляет собой взвешенную сумму:

$$\mathcal{L}_{total} = \lambda_1\mathcal{L}_{\mathcal{PDE}} + \lambda_2\mathcal{L}_{\mathcal{IC}} + \lambda_3\mathcal{L}_{\mathcal{BC}}$$

Здесь $\mathcal{L}_{\mathcal{IC}}$ (initial condition) отвечает за соответствие функции выплат в момент экспирации T, а $\mathcal{L}_{\mathcal{BC}}$ (boundary

conditions) накладывает ограничения при $S \to 0$ и $S \to \infty$. Использование весовых коэффициентов λ_i позволяет адаптивно балансировать вклад различных физических ограничений в процессе обучения, обеспечивая сходимость модели к физически согласованному решению.

Для ценообразования американских опционов с возможностью преждевременного исполнения Kazemian et al. [5] предлагают модификацию в виде obstacle-style релаксации. В рамках этого подхода нейросетевое решение сохраняет невязку PDE в области продолжения, одновременно удовлетворяя условию отсутствия арбитража $\widehat{V_\theta}(S,t) \geq \Psi(S)$, где $\Psi(S)$ — функция выплат (payoff), реализуемая через специальную проекцию выходного слоя. Данный метод формально заменяет поиск свободной границы неявным ограничением в функции потерь, что существенно упрощает вычислительную процедуру по сравнению с классическими алгоритмами отслеживания границ. Применительно к уравнению Фоккера–Планка–Колмогорова (FPK), описывающему эволюцию плотности вероятности, Duan et al. [6] демонстрируют критическую важность нормализационных ограничений $\int \widehat{p_\theta}(x,t)dx = 1$. Эти ограничения интегрируются как soft-регуляризация в общую функцию потерь, что предотвращает сходимость модели к тривиальному нулевому решению и обеспечивает сохранение вероятностной меры.

Дальнейшее развитие концепции привело к разработке специализированных архитектур — Finance-Informed Neural Networks (FINNs). В частности, Liu & E. [7] вводят нейронную сеть Колмогорова–Арнольда (Kolmogorov-Arnold Finance-Informed Neural Network, KAFIN), которая интегрирует фундаментальное представление Колмогорова–Арнольда в структуру сети. Архитектура KAFIN параметризует ценовую функцию через разложение:

$$\widehat{V_\theta}(x) = \sum_{i=1}^{2n+1} \Phi_i \left(\sum_{j=1}^{n} \phi_{i,j}(x_j) \right)$$

где внутренние одномерные функции $\phi_{i,j}$ трансформируют входные переменные, а внешние функции Φ_i агрегируют их вклады. Такая структура обеспечивает эффективную декомпозицию многомерных финансовых зависимостей, снижая сложность аппроксимации и улучшая интерпретируемость модели («прозрачность» влияния отдельных факторов). Функция потерь KAFIN, аналогично PINNs, включает компоненты, соответствующие начальным и граничным условиям, а также финансовому управляющему уравнению, минимизируя отклонения от теоретических законов рыночных механизмов и обеспечивая высокую точность в задачах высокой размерности.

Интеграция условий отсутствия арбитража представляет собой ключевое требование для практического применения PINNs в финансовых задачах. Kazemian et al. [5] подчеркивают необходимость жесткого ограничения выходного отображения нейронной сети для гарантии соблюдения границ no-arbitrage bounds. В частности, для европейских колл-опционов реализуется проекция выходного значения на интервал $\max\left(0, S - Ke^{-r(T-t)}\right) \leq \widehat{V_\theta} \leq S$, а для американских пут-опционов — на интервал $\max(0, K - S) \leq \widehat{V_\theta} \leq K$.

Математически это достигается через использование логистического преобразования (сигмоиды) над нормализованным выходом сети. Процедура включает нормировку целевой функции $f = \left(\hat{V} - L\right) / \left(U - L\right)$, где L и U — нижняя и верхняя границы соответственно, с последующим преобразованием в логит-пространство $z = \log\left(f / (1 - f)\right)$. Обучение модели проводится на переменной z, а на этапе инференса выполняется обратное преобразование. Такой подход гарантирует, что предсказания модели всегда остаются внутри теоретически допустимого диапазона, автоматически удовлетворяя фундаментальным финансовым неравенствам и полностью исключая возможность арбитража в рамках аппроксимации.

Критические вызовы применения PINNs в финансах концентрируются вокруг обработки разрывных payoff-функций и обеспечения сходимости для FPK-уравнений. Разрывные производные в точке исполнения страйка создают особые трудности для нейронных сетей, склонных к гладкой интерполяции. Kazemian et al. [5] отмечают, что ошибки достигают максимума в окрестности $S \approx K$ и при $t \to T$, где решение демонстрирует наиболее резкие изменения. Duan et al. (2025) [6] систематически исследуют проблему сходимости PINNs для FPK-уравнений, устанавливая, что стандартные реализации склонны к сходимости к тривиальному решению $p(x,t) \equiv 0$ из-за недостаточной регуляризации массы вероятности. Предлагаемая модификация DSN-PINNs (Distribution Self-adaptive Normalized PINNs) включает двухэтапную процедуру: предобучение с нормализационным ограничением, реализуемым как $\mathcal{L}_n = \left|\bar{p}(x,t;w) - C_T / \mathcal{M}(\mathcal{Q})\right|^2$, и последующую адаптивную ресэмплинг на основе оцененного распределения с использованием взвешенной ядерной оценки плотности.

Фундаментальное различие между soft constraints и hard constraints существенно влияет на свойства сходимости PINNs. Soft constraints, представленные весовыми коэффициентами в функции потерь ($\lambda_r, \lambda_i, \lambda_b$), обеспечивают гибкость балансирования между различными

физическими требованиями, но требуют тщательной настройки весов для предотвращения доминирования отдельных компонентов. Hard constraints, реализуемые через архитектурные модификации или точное удовлетворение определенных условий, гарантируют строгое соблюдение критических ограничений (например, нормализации вероятности или no-arbitrage bounds), потенциально улучшая устойчивость обучения, но ограничивая гибкость модели. Duan et al. [6] демонстрируют, что интеграция нормализации как soft constraint с адаптивным ресэмплингом обеспечивает компромисс между вычислительной эффективностью и точностью решения, достигая MAE порядка 10^{-3} для многомерных FPK-уравнений при значительном сокращении вычислительных затрат по сравнению с методами Монте-Карло.

Операторное обучение переходит от аппроксимации функций к изучению отображений между бесконечномерными функциональными пространствами. Теоретическая база, согласно Lu et al. [8], опирается на теорему об универсальной аппроксимации операторов. Ключевым свойством таких моделей является инвариантность к дискретизации [9], позволяющая переносить решения между сетками разного разрешения без переобучения. Реализацией этого подхода стала архитектура DeepONet [8], объединяющая через скалярное произведение выходы двух подсетей: branch net (кодирование входного пространства параметров) и trunk net (кодирование координат домена). Модель эффективно аппроксимирует явные и неявные операторы, описывающие стохастические дифференциальные уравнения.

Альтернативный подход представлен в работе Li et al. [9], где предложен Fourier Neural Operator (FNO), параметризующий интегральное ядро в пространстве Фурье. Авторы показывают, что использование быстрого преобразования Фурье (FFT) обеспечивает квазилинейную сложность $O(N\log N)$, ускоряя вычисления на три порядка относительно традиционных решателей. Уникальной особенностью FNO является способность к zero-shot super-resolution, позволяющая модели экстраполировать решения на более высокие разрешения без дополнительного обучения.

Сравнительный анализ вычислительной эффективности выявляет фундаментальное различие: методы типа Neural-FEM (PINNs) аппроксимируют решение для конкретного экземпляра уравнения, требуя переобучения при любом изменении параметров. В отличие от них, нейронные операторы (DeepONet, FNO) изучают отображение между бесконечномерными функциональными пространствами. Обучаясь на семействе PDE, операторные архитектуры требуют лишь прямого прохода сети (forward pass) для получения решения при новых входных данных.

Согласно Li et al. [9], в задачах с множественными вычислениями (например, MCMC) использование FNO сокращает время расчетов с часов до минут, обеспечивая ускорение на несколько порядков без потери точности. Таким образом, если PINNs заменяют базисные функции классических конечных элементов пространством нейросетей для решения одной задачи без размеченных данных, то операторный подход позволяет радикально оптимизировать ресурсоемкие процессы калибровки и риск-менеджмента за счет инвариантности к параметрам уравнения.

Эволюцию вычислительных методов — от классических численных решателей и PINNs к нейронным операторам — можно охарактеризовать как концептуальный переход от поиска аппроксимации конкретной функции к изучению отображения между бесконечномерными пространствами:

$$\underbrace{\theta \mapsto \hat{V}(x,t)}_{\text{PINNs}} \text{Эволюция} \rightarrow \underbrace{\mathcal{G}_{\cdot} : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{V}}_{\text{Neural Operators}}$$

В левой части (PINNs) нейронная сеть ищет функцию значения $\hat{V}$ для фиксированного набора параметров уравнения. В правой части (Neural Operators) параметризуется нелинейный оператор $\mathcal{G}_\theta$, который принимает на вход функциональные параметры (например, локальную волатильность $\sigma(S,t)$ или коэффициент сноса $\mu(S,t)$) и мгновенно возвращает соответствующую функцию решения V во всей области определения.

Гибридное направление — Physics-Informed Neural Operators (PINO) — объединяет операторный подход с физическими ограничениями (residual-based loss), что нивелирует главный недостаток операторов: потребность в избыточных обучающих данных. В задачах стохастических СДУ нейронные операторы выступают сверхбыстрыми «эмуляторами», способными аппроксимировать отображение параметров в состояние системы за миллисекунды.

Критическую значимость это имеет для байесовского вывода и алгоритмов MCMC. По данным Li et al. [9], замена традиционных решателей на Fourier Neural Operator (FNO) сокращает время расчетов MCMC с часов до минут при сохранении сопоставимой точности. Для обеспечения надежности в условиях рыночной неопределенности применяются методы количественной оценки неопределенности (UQ), такие как ансамблирование (Deep Ensembles), позволяющие калибровать доверительные интервалы предсказаний.

Однако при решении обратных задач стандартные операторы могут проявлять неустойчивость к шуму. Для преодоления этого барьера Behroozi et al. [10] предложили архитектуру Sensitivity-Constrained FNO (SC-FNO),

в которой в функцию потерь введен регуляризатор чувствительности (Jacobian loss), обеспечивающий устойчивость инверсии параметров.

Behroozi et al. [10] демонстрируют, что принудительное обучение градиентам решения по параметрам ($\partial u / \partial p$) не только повышает точность восстановления параметров в обратных задачах, но и значительно снижает требования к объему обучающей выборки. SC-FNO оказывается устойчивым к «дрейфу концепций» (concept drift) и эффективно справляется с многомерными параметрическими пространствами (до 80+ параметров), что ранее было недоступно для классических FNO.

Практическое применение нейронных операторов в финансах сосредоточено на калибровке поверхностей волатильности и моделировании процессов с прыжками. Благодаря спектральной параметризации FNO эффективно аппроксимирует интегро-дифференциальные уравнения (модели Мертона, Коу), обеспечивая мгновенный пересчет рисков в реальном времени.

Главным преимуществом нейросетевых подходов является их «безсеточная» (mesh-free) природа, позволяющая, по данным Zhai et al. [11], обходить «проклятие размерности» при решении уравнений Фоккера-Планка. Yang et al. [12] теоретически обосновали сходимость таких моделей (NN-SDE) без экспоненциального роста сложности, что критично для портфелей с числом активов $d > 50$. Использование Lévy-индуцированных сетей дополнительно позволяет улавливать ценовые скачки, недоступные классическим моделям ARIMA или LSTM.

Интеграция операторов с методами Монте-Карло (MC) создает гибридные схемы, где MC генерирует опорные точки для обучения сверхбыстрого суррогата [11]. Обученная сеть заменяет ресурсоемкие схемы Эйлера-Маруямы, сокращая время инференса до долей секунды [9]. Таким образом, комбинация FNO и DeepONet с методами регуляризации чувствительности [10] формирует новый стандарт суррогатного моделирования высокоразмерных финансовых систем.

Для систематизации выявленных различий между классическими и нейросетевыми подходами в таблице 1 представлено количественное сравнение методов по ключевым критериям вычислительной эффективности, требований к данным и применимости в практических финансовых задачах.

Анализ выявляет компромисс между универсальностью и специализацией методов. Классические подходы обеспечивают интерпретируемость и гарантии отсутствия арбитража, необходимые для регуляторного соответствия. PINNs сочетают физическую строгость с гибкостью нейросетей, однако ограничены вычислительными затратами на переобучение. Нейросетевые операторы (DeepONet, FNO, SC-FNO) демонстрируют превосходство в задачах с переменными параметрами, приоритизируя эффективность. Ключевым результатом является преодоление «проклятия размерности» операторными методами, что делает возможным моделирование мульти-ассетных портфелей ($d > 50$), недоступное традиционным алгоритмам.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило, что классические методы (Монте-Карло, FDM) ограничены «проклятием размерности», тогда как переход к глубокому обучению знаменует сдвиг к изучению непрерывных отображений между функциональными пространствами. На основании анализа авторами сформулированы следующие выводы:

1. Архитектуры PINNs эффективно интегрируют финансовые законы в функцию потерь, а модификации типа KAFIN и DSN-PINNs успешно решают задачи с разрывными выплатами и уравнениями

Таблица 1.

Сравнительный анализ численных методов решения стохастических дифференциальных уравнений в финансах

Критерий сравнения	Классические (MC / FDM)	PINNs (Physics-Informed)	Операторные методы (FNO / DeepONet)
Точность (L2 / MAE)	$O\left(N^{-1/2}\right)$ / $O\left(h^2\right)$	Высокая $\left(10^{-3} - 10^{-4}\right)$	Стабильная (<1%)
Скорость инференса	Низкая (требует новых расчетов)	Средняя (требует переобучения)	Высокая (миллисекунды)
Масштабируемость (d)	Экспоненциальные затраты	Эффективно до $d \approx 20$	Преодолевает $d > 100$
Потребность в данных	Не требуются	Минимальные	Высокие (обучающая выборка)
Обратные задачи	Итерационный подбор	Прямое встраивание в Loss	Нативно (через Jacobian)
Гарантии No-arbitrage	Встроены в алгоритм	Требуют проекции выхода	Не гарантированы (черный ящик)
Основная ниша	Простые активы, лимиты VaR	Сложная калибровка параметров	HFT, риск-менеджмент портфеля

Фоккера–Планка–Колмогорова с высокой точностью.

2. Нейросетевые операторы (DeepONet, FNO) обеспечивают инференс в реальном времени. Благодаря инвариантности к дискретизации они ускоряют ресурсоемкие расчеты (MCMC) с часов до миллисекунд.
3. Гибридизация в форме PINO является наиболее перспективным вектором, сочетая мгновенный отклик с физической строгостью.

Синергия операторного и физически-информированного обучения формирует новый стандарт суррогатного моделирования, позволяя эффективно управлять рисками в высокоразмерных системах ($d > 50$) и преодолевать классические вычислительные барьеры в количественных финансах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Karniadakis G.E., Kevrekidis I.G., Lu L., Perdikaris P., Wang S., Yang L. (2021). Physics-informed machine learning. Nature Reviews Physics, 3(6), 422–440.
2. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. Journal of Computational Physics, 378, 686–707.
3. Han J., Jentzen A., E W. (2018). Solving high-dimensional partial differential equations using deep learning. PNAS, 115(34), 8505–8510.
4. Gatta F., Schiano Di Cola V., Giampaolo F., Piccialli F., Cuomo S. (2023). Meshless methods for American option pricing through Physics-Informed Neural Networks. Engineering Analysis with Boundary Elements, 151, 68–82.
5. Kazemian Sina & Farhani Ghazal & Yazdi Amirhessam. (2025). An uncertainty-aware physics-informed neural network solution for the Black-Scholes equation: a novel framework for option pricing.
6. Duan Y., Wang X., Zhang Z. (2025). Solving Fokker-Planck-Kolmogorov equation by distribution self-adaptation normalized physics-informed neural networks.
7. Liu J., E W. (2024). Kolmogorov-Arnold Finance-Informed Neural Network in option pricing. Applied Sciences, 14(24), 11618.
8. Lu L., Jin P., Pang G., Zhang Z., Karniadakis G.E. (2021). Learning nonlinear operators via DeepONet based on the universal approximation theorem of operators. Nature Machine Intelligence, 3(3), 218–229.
9. Li Z., Kovachki N., Azizzadenesheli K., Liu B., Bhattacharya K., Stuart A., Anandkumar, A. (2021). Fourier neural operator for parametric partial differential equations. ICLR.
10. Behroozi A., Shen C., & Kifer D. (2025). Sensitivity-constrained Fourier neural operators for forward and inverse problems in parametric differential equations. In Proceedings of the 13th International Conference on Learning Representations (ICLR 2025). https://openreview.net/forum?id=DPzQ5n3mNm
11. Zhai J., Dobson M., & Li Y. (2022). A deep learning method for solving Fokker-Planck equations. In Proceedings of the 2nd Mathematical and Scientific Machine Learning Conference (pp. 568–597). Proceedings of Machine Learning Research, 145. https://proceedings.mlr.press/v145/zhai22a.html
12. Yang L., Gao T., Lu Y., Duan J., & Liu T. (2023). Neural network stochastic differential equation models with applications to financial data forecasting. Applied Mathematical Modelling, 115, 279–299. https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.10.041

© Джалмухамбетова Елена Азатуллаевна (elena_jalm@mail.ru); Карташов Максим Вячеславович;
Сячина Евгения Ильинична (eanyushina@yandex.ru); Тошпулотов Алишер Аминович (a.toshpulotov@yandex.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.07

БАЙЕСОВСКИЙ СЕТЕВОЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ РИСКОВ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ ВНЕДРЕНИЕ И РАСШИРЕНИЕ МОДЕЛИ FAIR

BAYESIAN NETWORK APPROACH TO CYBERSECURITY RISK ASSESSMENT IMPLEMENTATION AND EXPANSION OF THE FAIR MODEL

M. Zhelenkova
Ya. Goldovsky

Summary. Cybersecurity has become a critical issue for most organisations due to their growing dependence on IT systems and the increasing complexity of the network environment. The article discusses an approach to assessing cybersecurity risks based on the Bayesian network approach and the FAIR model. A comparative analysis of various methods for quantitative assessment and management of cyber risks is conducted. The author describes a methodology for adaptive stochastic cyber resilience management based on a hybrid architecture of dynamic Bayesian networks with continuous time. A mathematical formalisation of the methodology is also presented, based on stochastic differential equations describing the evolution of security parameters over time.

Keywords: information security, risks, model, Bayesian network, assessment, dynamics.

Желенкова Маргарита Борисовна
Ассистент, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва
vfhujirf5@mail.ru
Голдовский Яков Михайлович
Кандидат технических наук, доцент, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва
goldovsky_ym@mail.ru

Аннотация. Кибербезопасность стала критически важной проблемой для большинства организаций в связи с их растущей зависимостью от ИТ-систем и увеличением сложности сетевой среды. В статье рассмотрен подход к оценке рисков кибербезопасности на основе байесовского сетевого подхода и модели FAIR. Проведен сравнительный анализ различных методов количественной оценки и управления киберрисками. Описана разработанная автором методология адаптивного стохастического управления киберустойчивостью, базирующаяся на гибридной архитектуре динамических байесовских сетей с непрерывным временем. Представлена математическая формализация методологии, основу которой составляют стохастические дифференциальные уравнения, описывающие эволюцию параметров защищенности во времени.

Ключевые слова: информационная безопасность, риски, модель, байесовская сеть, оценка, динамика.

С ростом проникновения интернет-технологий во все сферы жизни и увеличением сложности сетевой среды, правительства и коммерческие организации стремятся защитить себя от разнообразных киберрисков. Эти риски обычно связаны с утечкой данных, взломом электронной почты, аномальными операциями в сети, такими как принудительные перерывы в работе онлайн-сервисов, которые зачастую приводят к экономическим потерям и другим серьезным последствиям.

Передовые практики кибербезопасности в значительной степени опираются на процесс управления рисками, который включает оценку и контроль различных угроз на информационные системы, подверженные атакам, повреждению или нарушению функционирования, а также обеспечение конфиденциальности, целостности и доступности обрабатываемой в них информации. Одним из общепризнанных процессов управления рисками кибербезопасности является подход, представленный в стандарте ISO/IEC 27005, ориентированный на непрерывную идентификацию, анализ, обработку и мониторинг рисков с целью достижения их приемлемого уровня (CRA) [1].

Факторный анализ информационных рисков (FAIR) является хорошо известной структурой CRA, которая широко применяется и признается, как в академических исследованиях, так и в практических приложениях. В то же время, нехватка данных, особенно исторических о нарушениях кибербезопасности, инцидентах и угрозах, препятствует разработке реалистичных моделей оценки рисков и уязвимости информационных систем. Кроме того, традиционные детерминированные и экспертно-ориентированные подходы характеризуются высокой долей субъективных оценок и ограниченным учетом причинно-следственных зависимостей. Это приводит к значительной погрешности и вариативности результатов при повторных анализах, особенно в динамически изменяющихся условиях [2]. Использование байесовского сетевого подхода в рамках расширения модели FAIR позволяет существенно увеличить число анализируемых факторов и сценариев риска, формализовать неопределённость и снизить среднюю погрешность оценки (см. табл. 1).

Таким образом, принимая во внимание вышеизложенное, задачи разработки модели оценки угроз сетевой безопасности на основе байесовского алгоритма

Таблица 1.

Сравнительный анализ традиционных и байесовских сетевых подходов к оценке рисков кибербезопасности

Показатель	Традиционные подходы	Байесовский сетевой подход
Тип математической модели	Детерминированная / полувероятностная	Вероятностная графовая
Число входных параметров в модели	8–15	20–50
Доля экспертных оценок в исходных данных, %	60–80	20–40
Число учитываемых причинно-следственных связей	≤10	40–120
Учет условных зависимостей	Отсутствует	Формализован
Возможность апостериорного обновления вероятностей	Отсутствует	Реализуется
Количество сценариев риска, анализируемых за один цикл	5–10	50–200
Средняя погрешность оценки годового риска, %	25–40	10–18
Дисперсия результатов при повторных оценках	Высокая	Низкая
Чувствительность к неполноте данных	Высокая	Умеренная
Минимальный объём наблюдений для устойчивой оценки	> 1 года	3–6 месяцев
Возможность учёта каскадных инцидентов	Не реализуется	Реализуется
Поддержка динамического мониторинга	Ограниченная	Полная
Временные затраты на обновление модели	Недели	Часы–дни
Применимость к сложным инфраструктурам	Ограниченная	Высокая

(составлено автором)

с учетом возможностей модели FAIR составляют перспективное направление научного поиска, что и предопределило выбор темы данной статьи.

Особенности факторного анализа информационных рисков, который предоставляет собой таксономическую структуру для классификации угроз кибербезопасности по набору количественно измеримых параметров и сочетает ее с количественными алгоритмами в форме симуляции Монте-Карло, описывают в своих трудах Вильховский Д.Э. [3], Piotr Żebrowski, Aitor Couce-Vieira, Alessandro Mancuso [4], Lei Wei [5].

Возможности динамических байесовских сетей обновлять апостериорные вероятности по мере появления новых записей в журналах или информации об угрозах, что позволяет прогнозировать краткосрочные риски, детально рассматривают Таупыкбай Е.Б. [6], Панилов П.А. [7], Ambairam Muthu Sivakrishna, R. Mohan, Valaparla Rohini [8], Danilo Bruschi [9].

В то же время, несмотря на развитость модели FAIR и активное внедрение байесовских сетей для оценки рисков кибербезопасности, в настоящее время сохраняются нерешённые вопросы, связанные с формализацией априорных распределений вероятностей при дефиците достоверных эмпирических данных и высокой неопределённостью исходных допущений. Кроме того, недостаточно проработаны методы динамического обновления байесовских моделей риска в условиях быстро меняющегося ландшафта угроз и их интеграции с количественными метриками FAIR для поддержки управленческих решений в режиме, близком к реальному времени.

Таким образом, цель статьи заключается в изучении возможностей использования байесовского сетевого подхода к оценке рисков кибербезопасности с расширением модели FAIR.

Традиционные подходы к анализу информационных рисков, включая модели на основе факторного анализа (FAIR) и их расширения через статические байесовские сети, обладают существенным методологическим недостатком — дискретностью и статичностью оценки. Как показано в работах ряда автором, применение байесовских сетей позволяет устранить жесткость распределений (например, треугольных), свойственную FAIR, и учесть причинно-следственные связи [1; 7; 10]. Однако данные модели рассматривают состояние системы как неизменный «снимок», игнорируя временную динамику развития кибератаки и деградацию защитных механизмов.

Очевидно, что в реальности процесс реализации угрозы является многостадийным и стохастическим. Вероятность успешной эксплуатации уязвимости в момент времени $t + \Delta t$ условно зависит от состояния системы в момент времени t. Следовательно, для адекватного моделирования необходимо перейти от статической оценки вероятности событий к оценке интенсивности переходов между состояниями защищенности. В данном контексте особого внимания заслуживают динамические байесовские сети с непрерывным временем, пред-

ставляющие собой направленные ациклические графы, обеспечивающие факторизацию совместного распределения вероятностей. Такие модели состоят из узлов, соответствующих случайным переменным, и дуг, отражающих причинно-следственные или вероятностные зависимости, параметры которых задаются вероятностными весами и в ряде случаев формализуются с использованием статистических либо детерминированных функций.

Для обоснования необходимости перехода к динамическому моделированию целесообразно провести сравнительный анализ эволюции методов оценки киберрисков. В таблице 2 представлено сопоставление классического метода FAIR, его реализации на базе статических байесовских сетей и предлагаемого метода адаптивного стохастического управления.

Итак, используя динамические байесовские сети, представляется возможным связать модель FAIR с другими передовыми моделями CRA для усовершенствования исходной модели оценки рисков кибербезопасности. Для реализации этого динамического подхода автором разработана структурно-функциональная схема, которая формализует контур адаптивного управления киберустойчивостью. Схема базируется на теории стохастического управления и включает объект защиты, подсистему наблюдения и адаптивный регулятор (см. рис. 1).

В рамках разработанного подхода таксономия FAIR трансформируется из статического дерева факторов в структурированное марковское пространство состояний, где каждый узел сети эволюционирует во времени под влиянием своих родителей.

Определим состояние информационной системы в момент времени t как факторизованный вектор $X(t)$, компоненты которого соответствуют ключевым узлам таксономии FAIR. Пусть граф байесовской сети $\mathcal{G} = (V, \mathcal{E})$ состоит из N узлов $X_1, \ldots, X_N$.

В контексте расширенной модели FAIR вектор состояния декомпозируется следующим образом:

$$X(t) = \{X_{TEF}(t), X_{Vuln}(t), X_{Asset}(t), X_{Control}(t)\}$$

где: $X_{TEF}(t)$ — стохастический процесс генерации угроз, принимающий значения из множества состояний активности, атакующего;

$X_{Vuln}(t)$ — текущий статус уязвимости, который изменяется во времени в зависимости от уровня технической реализуемости угрозы и применения обновлений;

$X_{Control}(t)$ — состояние контрмер, изменяемое управляющим воздействием $u(t)$;

$X_{Asset}(t)$ — состояние актива (целевая переменная), определяющая наличие ущерба.

В отличие от стандартных Марковских цепей, где задается одна глобальная матрица переходов, в дина-

Таблица 2.

Сравнительный анализ методов количественной оценки и управления киберрисками

Критерий сравнения	Классическая модель FAIR	Статические байесовские сети	Предлагаемый динамический метод
Учет временного фактора	Статический: оценка риска как «мгновенного снимка» состояния системы на фиксированный период.	Квази-статический: моделирование причинно-следственных связей, но без учета непрерывной эволюции атаки во времени.	Непрерывно-динамический: моделирование эволюции состояния системы $X(t)$ в реальном времени с использованием дифференциальных уравнений.
Математический базис	Арифметические операции над распределениями (Монте-Карло), приближенные методы (PERT).	Теория вероятностей, дискретный байесовский вывод на ациклических графах.	Стохастические дифференциальные уравнения, уравнения Колмогорова-Чепмена, теория оптимального управления.
Метрика риска	Произведение частоты на величину потерь.	Апостериорное распределение вероятностей потерь.	Интегральный функционал риска, учитывающий накопленный ущерб на горизонте планирования.
Моделирование защиты	Статический коэффициент сопротивления.	Условная вероятность блокировки угрозы.	Функция управления, динамически изменяющая матрицу интенсивностей переходов (адаптация).
Работа с неопределенностью	Субъективные экспертные оценки (калибровка).	Снижение энтропии за счет учета свидетельств.	Байесовская фильтрация: непрерывная коррекция оценки состояния на основе зашумленных данных мониторинга.
Тип управления	Реактивный (анализ постфактум).	Поддержка принятия решений «что-если».	Проактивный: автоматическая оптимизация стратегии защиты в замкнутом контуре управления.

(составлено автором)

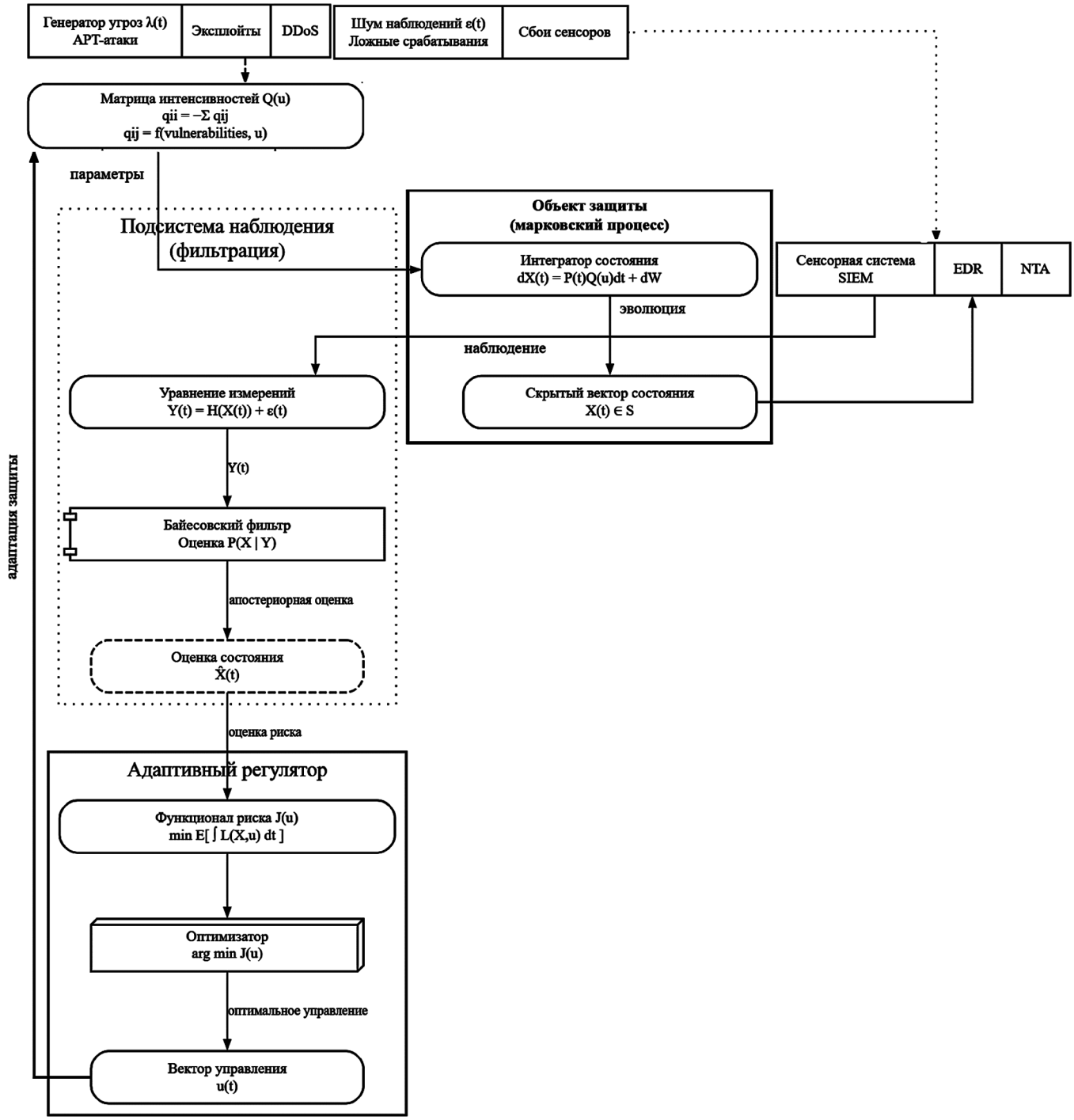


Рис. 1. Схема динамической оценки киберриска на основе гибридных стохастических сетей с непрерывным временем

(составлено автором)

мических байесовских сетях с непрерывным временем динамика определяется набором условных матриц интенсивностей. Для каждого узла X_i сети FAIR динамика изменения его состояния зависит от конфигурации родительских узлов $Pa(X_i)$.

Обозначим $Q_i(u_i)$ как семейство матриц интенсивностей для узла *i*, параметризованное состоянием родителей $u_i \in Val\left(Pa\left(X_i\right)\right)$. Элемент $q_{xy}^{i|u_i}$ определяет мгновенную вероятность перехода узла X_i из состояния *x* в состояние *y* при условии, что родители находятся в конфигурации u_i:

$$q_{xy}^{i|u_i} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P(X_i(t+t) = y \mid X_i(t) = x, Pa(X_i)(t) = u_i)}{\Delta t}$$

В рамках предложенного подхода интеграция методологии FAIR в структуру динамичной байесовской сети с непрерывным временем реализуется посредством функционального преобразования статических оценок риска в кинетические параметры марковского процесса. Факторы таксономии FAIR (Частота угроз — TEF, уязвимость — Vuln) выступают в качестве аргументов функций, определяющих интенсивности переходов $\lambda(t)$ для целевых узлов сети.

Рассмотрим узел «Состояние актива» (X_{Asset}), родительскими узлами которого являются «Активность угрозы» (X_{TEF}) и «Уровень уязвимости» (X_{Vuln}). Интенсивность перехода актива из защищенного состояния в скомпрометированное ($\lambda_{compromise}$) формализуется как функция от состояний родительских узлов:

$$\lambda_{compromise}(t) = \Psi\left(X_{TEF}(t), X_{Vuln}(t), X_{Control}(t)\right)$$

где Ψ — отображение пространства состояний факторов риска в пространство положительных действительных чисел (интенсивностей).

Для случая, соответствующего логике FAIR (где риск является композицией частоты угроз и уязвимости), условная матрица интенсивностей Q_{Asset} для конфигурации родителей {Threat=активная}, {Vuln=высокая} принимает вид:

$$Q_{Asset} \mid \begin{matrix}\text{Threat} = \text{активная} \\ \text{Vuln} = \text{высокая}\end{matrix} = \begin{pmatrix} -\lambda_{attack} & \lambda_{attack} \\ \mu_{recover} & -\mu_{recover} \end{pmatrix}$$

где: λ_{attack} — параметр, численно равный оценке частоты успешных атак в модели FAIR для данных условий;

$\mu_{recover}$ — интенсивность восстановления работоспособности актива (обратная величина к среднему времени восстановления).

Глобальная динамика всей системы описывается путем амальгамации локальных матриц Q_i. Глобальный генератор Q_{global} формируется как сумма тензорных произведений локальных условных матриц интенсивностей:

$$Q_{global}(X) = \oplus_{i=1}^{N} Q_i\left(Pa(X_i)\right)$$

Эволюция совместного распределения вероятностей $P(X,t)$ описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена, которая в данной постановке приобретает структурный вид:

$$\frac{dP(X,t)}{dt} = P(X,t) \cdot Q_{global}$$

Это уравнение заменяет статичные таблицы вероятностей классических Байесовских сетей на дифференциальные операторы. Оно позволяет рассчитать вероятность реализации риска как мгновенную вероятность нахождения системы в состоянии X_{Asset}= Loss в любой момент времени t, учитывая инерционность процессов атаки и защиты.

Итак, в предлагаемой динамической модели риск трансформируется в функционал. Пусть $L(X_{Asset})$ — функция потерь, определенная на состояниях актива. Тогда мгновенное значение риска $Risk(t)$ представляет собой математическое ожидание потерь по всему ансамблю состояний:

$$Risk(t) = \sum_{x \in Val(X)} L(x) \cdot P(X(t) = x \mid Y_{0:t})$$

Задача управления киберустойчивостью сводится к минимизации интегрального риска на горизонте T путем выбора траектории управляющих параметров $u(t)$ (изменяющих матрицы $Q_{Control}$), что формализуется как вариационная задача:

$$J = \int_0^T e^{-\rho t} Risk\left(t, u(t)\right) dt \rightarrow min$$

Резюмируя вышеизложенное, отметим, что описанная математическая формализация осуществляет строгий перевод статической таксономии FAIR на язык стохастических дифференциальных уравнений на графах, позволяя применять мощный аппарат теории управления для решения задач классификации киберрисков и управления информационной безопасностью.

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно сделать такие выводы.

Модель FAIR является эффективной методологией для анализа и расчета рисков кибербезопасности. Однако FAIR делает негибкие предположения, которые ограничивают как ее точность для ряда реальных сценариев, так и возможность интеграции в другие зрелые модели CRA. Кроме того, методология FAIR и ее расширения на базе статических байесовских сетей остаются дискретными инструментами, фиксирующими «мгновенный снимок» состояния системы. В условиях высокой динамики современных киберугроз, где процессы атаки и защиты развиваются непрерывно и стохастически, статичность моделей приводит к существенной недооценке накопленного риска и невозможности оперативного реагирования на изменения ландшафта угроз.

Учитывая отмеченное, в статье предложена методология адаптивного стохастического управления киберустойчивостью, которая базируется на гибридной архитектуре динамических байесовских сетей с непрерывным временем. В отличие от традиционных моделей, где факторы риска (частота событий, уязвимость) являются статичными параметрами, в разработанной методологии они трансформированы в переменные состояния, эволюция которых описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вильховский Д.Э. Возможности ИИ в сфере кибербезопасности: вопросы обнаружения, предотвращения и реагирования на SQL-инъекции, XSS- И CSRF-АТАКИ // Математические структуры и моделирование. 2024. № 4 (72). С. 111–124.
2. Володин Д.Н. Исследование подходов математического моделирования рисков в кибербезопасности // Научно-технический вестник Поволжья. 2025. № 6. С. 15–17.
3. Панилов П.А. Использование байесовских моделей и методов Монте-Карло для прогнозирования киберугроз // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2024. № 4. С. 79–88.
4. Таупыкбай Е.Б. Особенности исследования и разработки алгоритмов обеспечения безопасности данных для защиты от спама в инфокоммуникационной сети // Интернаука. 2024. № 6. С. 28–31.
5. Хайруллин Э.Р., Вульфин А.М., Васильев В.И. Нейросетевая система обнаружения сетевых атак // Системная инженерия и информационные технологии. 2025. Т. 7. № 1 (20). С. 105–112.
6. Javorník M., Husák M. Mission-centric decision support in cybersecurity via Bayesian Privilege Attack Graph // Engineering Reports. 2022. Vol. 4. No. 12. P. 29–34.
7. Żebrowski P., Couce-Vieira A., Mancuso A. A Bayesian Framework for the Analysis and Optimal Mitigation of Cyber Threats to Cyber-Physical Systems // Risk Analysis. 2022. Vol. 42. No. 10. P. 70–76.
8. Wei L. Application of Bayesian Algorithm in Risk Quantification for Network Security // Computational Intelligence and Neuroscience. 2022. Vol. 19. No. 1. P. 129–134.
9. Muthu S.A., Mohan R., Rohini V. An Efficient Insider Threat Detection Framework Using Bayesian-Optimized XGBoost // Security and Privacy. 2025. Vol. 8. No. 6. P. 63–71.
10. Bruschi D. Ransomware Detection Using Sample Entropy and Graphical Models: A Methodology for Explainable Artificial Intelligence (XAI) in Cybersecurity // Applied Stochastic Models in Business and Industry. 2025. Vol. 41. No. 6. P. 11–18.

© Желенкова Маргарита Борисовна (vfhujirf5@mail.ru); Голдовский Яков Михайлович (goldovsky_ym@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.08

АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПИД-РЕГУЛЯТОРА И ЕГО ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НА PYTHON

ALGORITHM FOR OPTIMIZING PID CONTROLLER PARAMETERS AND ITS PYTHON SOFTWARE IMPLEMENTATION

M. Zhuravleva
M. Samokhin

Summary. This paper addresses the problem of automatic optimization of PID controller parameters for automatic control systems with a second-order aperiodic plant. An algorithm for tuning the controller gains is proposed, based on the minimization of an extended integral performance index that accounts for the control error, overshoot, settling time, and control effort. The optimization procedure is implemented as a multi-stage grid search with adaptive narrowing of parameter ranges and rejection of unstable solutions. A software application with a graphical user interface has been developed, providing interactive configuration of the plant parameters, optimization settings, and visualization of simulation results. The effectiveness of the proposed approach is confirmed by time-domain simulations under a unit step input, demonstrating a significant improvement in the dynamic performance of the control system compared to a baseline PID tuning.

Keywords: PID controller, parameter optimization, integral performance index, second-order aperiodic plant, multi-stage grid search, time-domain simulation, software implementation, graphical user interface, automatic control systems.

Журавлева Марина Олеговна
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва
marina_030405@mail.ru
Самохин Михаил Николаевич
лаборант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва
miklesamoxin@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматривается задача автоматической оптимизации параметров ПИД-регулятора для систем автоматического управления с апериодическим объектом второго порядка. Предложен алгоритм подбора коэффициентов регулятора, основанный на минимизации расширенного интегрального критерия качества, учитывающего ошибку регулирования, перерегулирование, время установления и энергию управляющего воздействия. Алгоритм реализован в виде многостадийного сеточного поиска с адаптивным сужением диапазонов параметров и отбраковкой неустойчивых решений. Разработан программный комплекс с графическим пользовательским интерфейсом, обеспечивающий интерактивную настройку параметров моделирования, алгоритма оптимизации и визуализацию результатов. Эффективность предложенного подхода подтверждена результатами математического моделирования при ступенчатом воздействии, демонстрирующими существенное улучшение динамических характеристик системы управления по сравнению с базовой настройкой ПИД-регулятора.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, оптимизация параметров, интегральный критерий качества, апериодический объект второго порядка, многостадийный сеточный поиск, математическое моделирование, программная реализация, пользовательский интерфейс, системы автоматического управления.

ПИД-регуляторы широко применяются в системах автоматического управления благодаря простоте, универсальности и устойчивой практике промышленного использования [1-4]. Однако качество управления существенно зависит от выбора коэффициентов K_p, K_i, K_d [5,6]. Ручная настройка и эмпирические методы (например, метод Зиглера–Николса) не всегда обеспечивают требуемые показатели переходного процесса, особенно при наличии ограничений на управляющее воздействие и требований к быстродействию [5,12,13].

В инженерной практике возрастает потребность в программных инструментах, которые позволяют воспроизводимо и наглядно выполнять настройку параметров ПИД-регулятора на этапе проектирования без обязательного привлечения физического стенда [1,4]. Такой подход сокращает время подбора параметров, уменьшает субъективность настройки и позволяет проводить серию вычислительных экспериментов при варьировании параметров объекта управления.

Целью работы является разработка и исследование алгоритма оптимизации параметров ПИД-регулятора для апериодического объекта второго порядка, а также создание программного приложения с графическим интерфейсом для задания параметров моделирования, запуска оптимизации и анализа результатов.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

1. Построить математическую модель объекта управления и замкнутой системы с ПИД-регулятором.

2. Сформировать критерий качества и ограничения, отражающие требования к переходному процессу.
3. Разработать и реализовать алгоритм оптимизации параметров K_p, K_i, K_d.
4. Разработать пользовательский интерфейс приложения для настройки параметров и визуализации результатов.
5. Провести вычислительный эксперимент и сравнить базовую и оптимизированную настройки по метрикам качества.

Практическая значимость работы заключается в создании программного инструмента, позволяющего выполнять настройку и анализ ПИД-регулятора в интерактивном режиме, что может использоваться как в учебных задачах, так и на этапе предварительной настройки систем управления.

В рамках настоящей работы исследуется замкнутая система автоматического управления, включающая апериодический объект второго порядка и ПИД-регулятор. Математическое моделирование используется в качестве основного инструмента анализа, поскольку оно позволяет исследовать динамические свойства системы, варьировать параметры и оценивать влияние алгоритма оптимизации без использования физического оборудования.

В качестве объекта управления выбран типовой апериодический объект второго порядка, широко применяемый при анализе систем автоматического управления и адекватно описывающий динамику реальных технологических процессов [7,9]. Передаточная функция объекта имеет вид:

$$W(s) = \frac{1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \qquad (1)$$

где T_1 и T_2 — постоянные времени объекта управления.

Выбор данной модели обусловлен её универсальностью и тем, что она позволяет исследовать влияние параметров регулятора на быстродействие и устойчивость системы без усложнения математического описания. При этом объект второго порядка является более информативным по сравнению с объектами первого порядка, поскольку позволяет анализировать форму переходного процесса и характер изменения ошибки регулирования.

В программном приложении предусмотрена возможность изменения параметров T_1 и T_2, а также шага дискретизации по времени. Настройка данных параметров осуществляется через элементы пользовательского интерфейса, что позволяет оперативно исследовать влияние параметров объекта на динамику системы.

Показан процесс задания постоянных времени объекта и шага дискретизации с использованием ползунков и числовых полей.

Управление объектом осуществляется с помощью ПИД-регулятора, формирующего управляющее воздействие на основе ошибки регулирования. Ошибка определяется как разность между заданием и текущим выходом системы:

$$e(t) = r(t) - y(t), \qquad (2)$$

где $r(t)$ — задающее воздействие, $y(t)$ — выход объекта управления.

Непрерывный закон управления ПИД-регулятора имеет следующий вид:

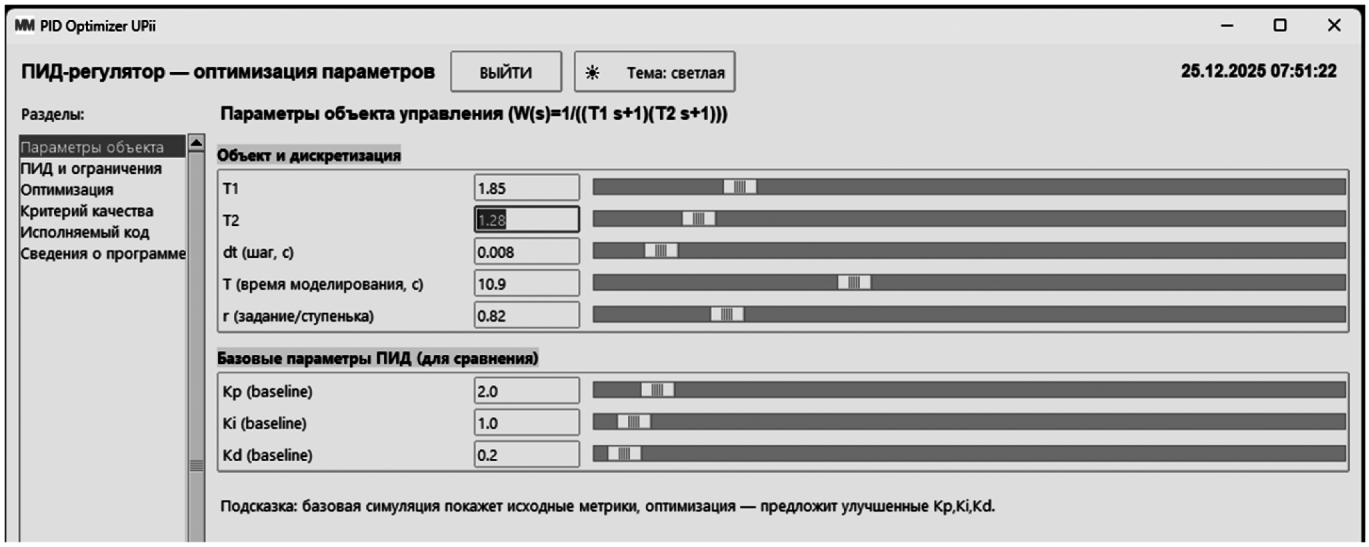


Рис. 1. Изменение параметров объекта и дискретизации на главном экране

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \qquad (3)$$

где K_p, K_i, K_d — коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих соответственно [5,6].

Пропорциональная составляющая обеспечивает формирование управляющего воздействия, пропорционального текущей ошибке, интегральная — устраняет статическую ошибку, а дифференциальная — повышает быстродействие системы за счёт учёта скорости изменения ошибки.

Поскольку моделирование и оптимизация выполняются в цифровой вычислительной среде, ПИД-регулятор реализуется в дискретной форме с шагом дискретизации Δt. Интегральная составляющая аппроксимируется методом прямоугольников, а дифференциальная — с использованием фильтра первой степени, что позволяет снизить влияние высокочастотных помех.

Кроме того, в программной реализации используются следующие дополнительные механизмы:

- ограничение управляющего воздействия $u(t)$;
- anti-windup интегратора при достижении насыщения;
- контроль предельных значений выхода и управляющего сигнала для выявления неустойчивых режимов.

Настройка указанных параметров осуществляется в разделе интерфейса «ПИД и ограничения».

В интерфейсе задаются пределы управляющего воздействия, параметры фильтра производной и режим anti-windup.

Использование данных механизмов позволяет повысить устойчивость численного моделирования и приближает поведение регулятора к условиям реальной эксплуатации в автоматизированных системах управления.

После задания математической модели замкнутой системы управления возникает задача выбора таких параметров ПИД-регулятора, при которых обеспечивается требуемое качество переходного процесса. В рамках данной работы настройка параметров регулятора рассматривается как задача оптимизации по заданному критерию качества, формируемому на основе динамических характеристик системы.

Оптимизации подлежат коэффициенты ПИД-регулятора, образующие вектор параметров:

$$\theta = (K_p, K_i, K_d). \qquad (4)$$

Поиск оптимального решения осуществляется в заданных диапазонах изменения параметров, которые

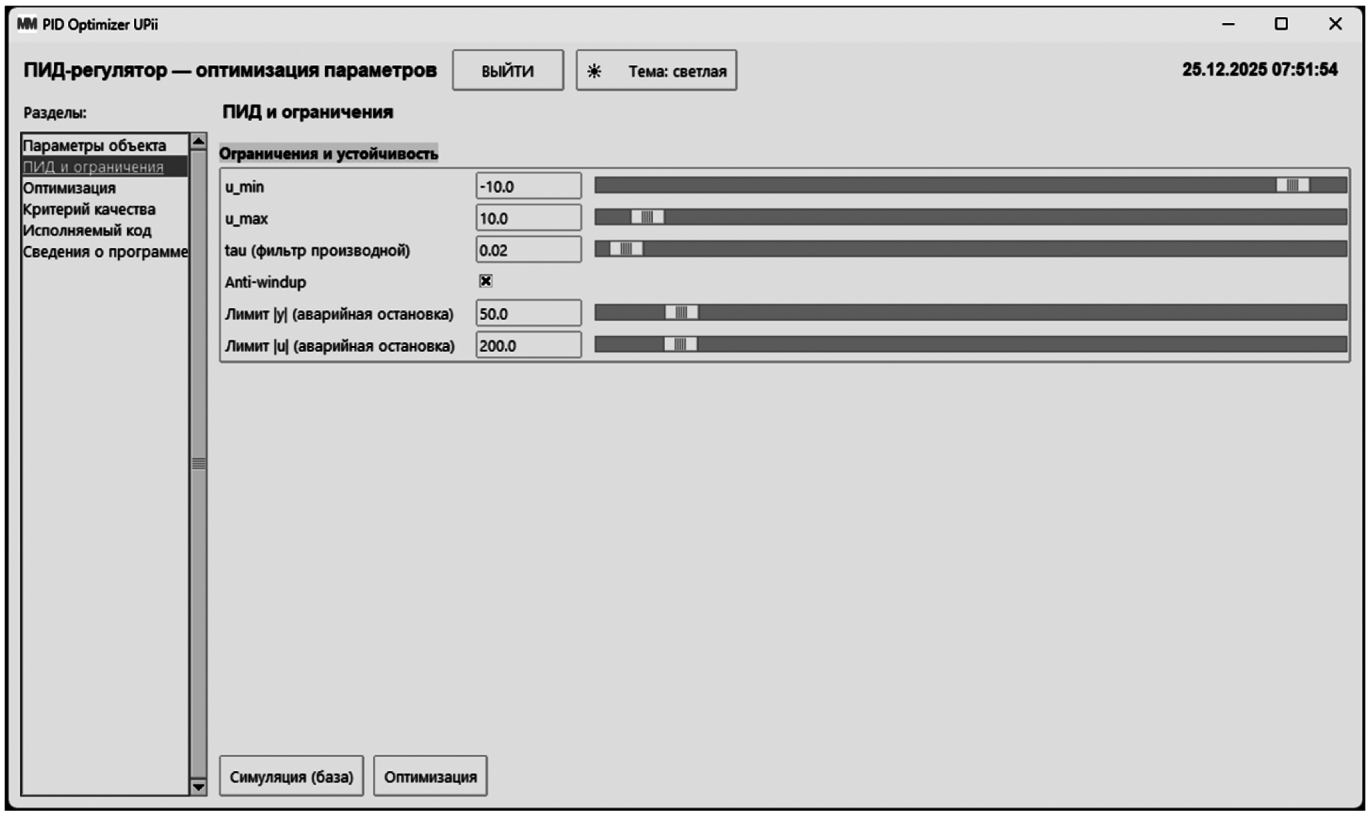


Рис. 2. Раздел «ПИД и ограничения»: параметры ограничений и проверки устойчивости

выбираются исходя из требований устойчивости системы и практической реализуемости регулятора. Ограничение диапазонов позволяет сократить область поиска и исключить заведомо некорректные режимы.

Кроме того, в процессе оптимизации вводятся дополнительные ограничения:

- ограничение управляющего воздействия;
- контроль предельных значений выхода системы;
- отбраковка неустойчивых решений, при которых наблюдается неограниченный рост выходного сигнала или управляющего воздействия.

Наличие указанных ограничений обеспечивает корректность вычислительного эксперимента и предотвращает искажение результатов оптимизации.

В качестве базового показателя качества управления используется интегральный квадрат ошибки регулирования (ISE), широко применяемый при анализе и синтезе систем автоматического управления. Данный критерий имеет вид:

$$J_{ISE} = \int_0^T e^2(t)\,dt, \qquad (5)$$

где $e(t)$ — ошибка регулирования, T — время моделирования.

Минимизация данного функционала способствует снижению средней квадратичной ошибки за весь интервал переходного процесса [1,4,10]. Однако использование только критерия (5) не позволяет в полной мере учесть требования к перерегулированию, быстродействию и величине управляющего воздействия.

Для более полного учёта характеристик переходного процесса в работе используется расширенный критерий качества, включающий штрафные слагаемые. Общий вид критерия оптимизации имеет следующий вид:

$$J = \int_0^T e^2(t)\,dt + \alpha P_{OS} + \beta P_{TS} + \gamma \int_0^T u^2(t)\,dt, \qquad (6)$$

где:

- P_{OS} — штраф за перерегулирование;
- P_{TS} — штраф за превышение допустимого времени установления;
- α, β, γ — весовые коэффициенты, определяющие вклад соответствующих слагаемых в общий критерий.

Штраф за перерегулирование формируется при превышении заданного допустимого уровня, а штраф за время установления — при превышении целевого значения времени выхода системы в установившийся режим. Последнее слагаемое учитывает энергию управляющего воздействия и позволяет ограничить чрезмерно резкие управляющие сигналы.

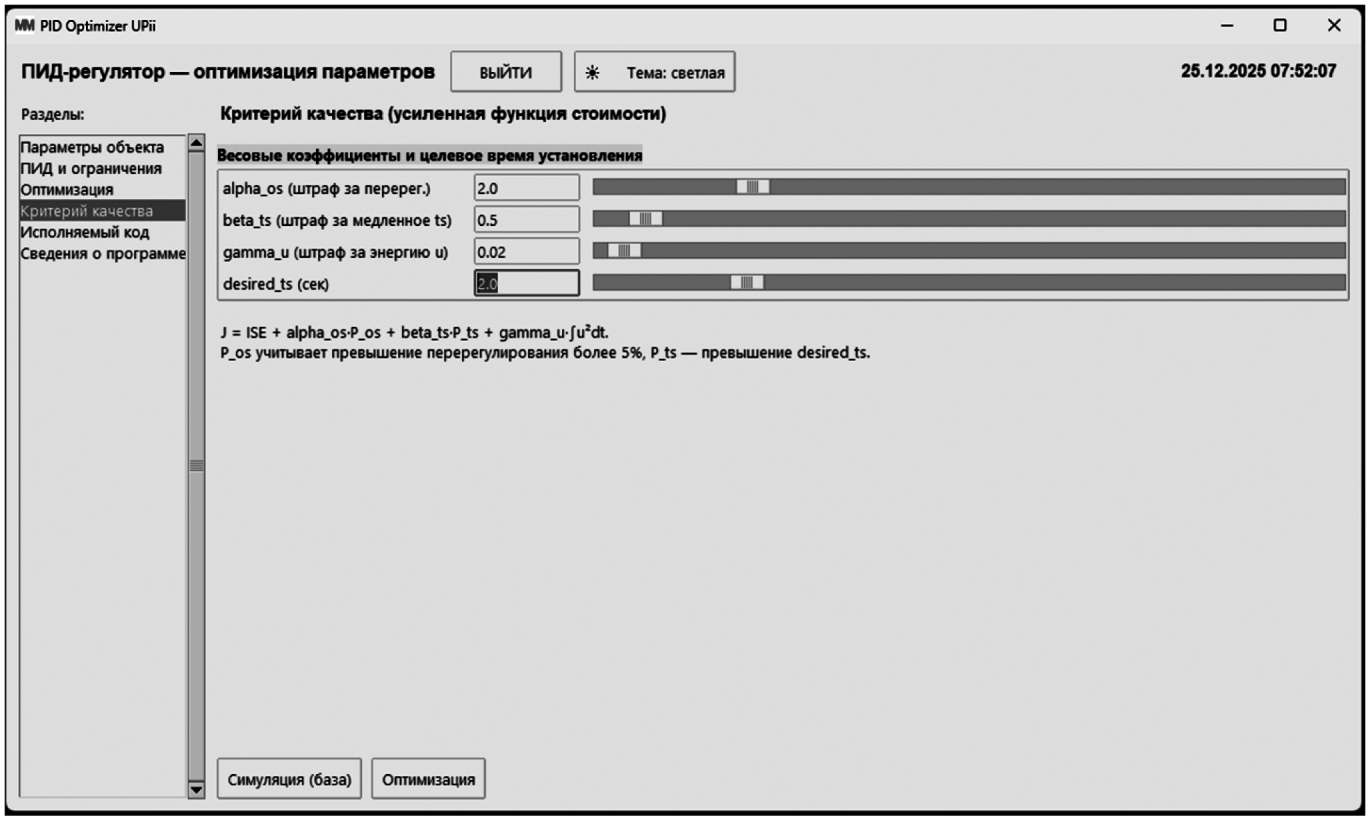


Рис. 3. Раздел «Критерий качества»: изменение параметров функции стоимости

Таким образом, критерий (6) обеспечивает компромисс между точностью, быстродействием и плавностью управления [5,12].

Для повышения гибкости алгоритма оптимизации в программном приложении реализована возможность интерактивной настройки параметров критерия качества. В разделе «Критерий качества» пользователь может изменять весовые коэффициенты штрафных слагаемых, а также задавать целевое время установления.

Показана настройка весовых коэффициентов штрафов и целевого времени установления.

Дополнительно предусмотрена расширенная форма настройки критерия, позволяющая более точно адаптировать функцию стоимости под требования к переходному процессу.

Интерфейс позволяет формировать критерий оптимизации в зависимости от приоритетов задачи управления.

Интерактивное задание параметров критерия делает процесс оптимизации наглядным и позволяет исследовать влияние различных весов штрафных слагаемых на результаты настройки регулятора.

Таким образом, задача оптимизации параметров ПИД-регулятора сведена к задаче минимизации расширенного интегрального критерия качества при наличии ограничений и условий устойчивости. На основе сформулированной постановки далее разрабатывается алгоритм оптимизации, обеспечивающий автоматический подбор параметров регулятора.

После формулировки задачи оптимизации и задания критерия качества возникает необходимость разработки алгоритма, обеспечивающего автоматический подбор параметров ПИД-регулятора в заданных диапазонах с учётом ограничений и требований устойчивости. В рамках данной работы выбран алгоритм поисковой оптимизации, ориентированный на воспроизводимость результатов, наглядность и простоту программной реализации.

Оптимизация параметров ПИД-регулятора рассматривается как задача поиска минимума целевой функции качества J, определённой выражением (6), в пространстве параметров $\left(K_p, K_i, K_d\right)$. Для решения данной задачи используется многостадийный сеточный поиск с адаптивным сужением диапазонов [5,12,13].

На первой стадии алгоритма параметры регулятора перебираются на грубой сетке в заранее заданных диапазонах. Для каждой комбинации параметров выполняется моделирование замкнутой системы управления, после чего вычисляется значение критерия качества.

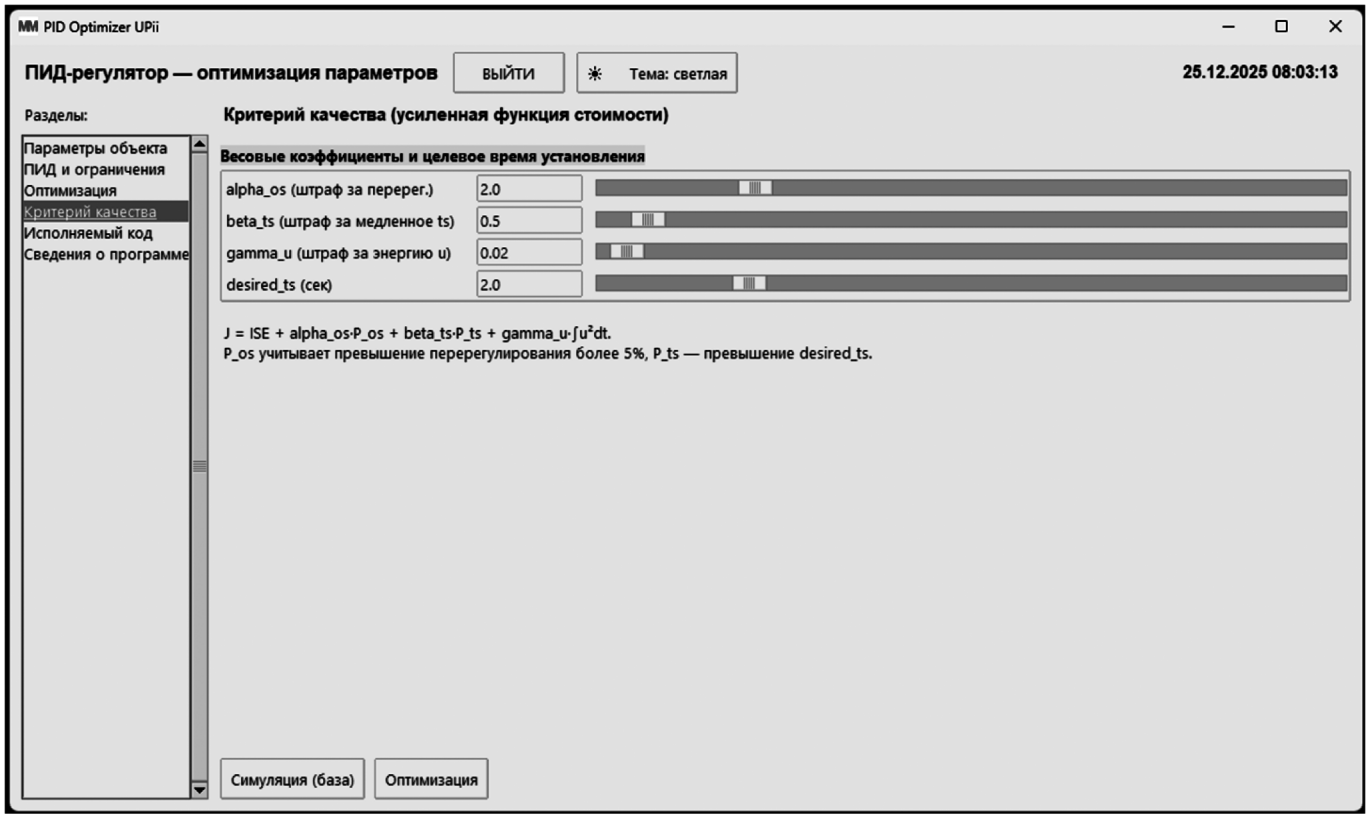


Рис. 4. Раздел «Критерий качества»: расширенная настройка параметров критерия оптимизации

Комбинации, приводящие к неустойчивости системы или выходу сигналов за допустимые пределы, автоматически исключаются из дальнейшего рассмотрения.

На последующих стадиях алгоритма диапазоны изменения параметров сужаются вокруг найденного лучшего решения, а поиск повторяется с более мелким шагом. Такой подход позволяет последовательно уточнять оптимальные значения параметров без существенного роста вычислительной сложности.

Задача оптимизации может быть формально записана следующим образом:

$$\theta^* = \underset{\theta \in \mathbb{C}}{\operatorname{argmin}} J(\theta), \quad (7)$$

где $\theta = (K_p, K_i, K_d)$ — вектор параметров ПИД-регулятора, Ω — допустимая область параметров, определяемая заданными диапазонами и ограничениями, $J(\theta)$ — критерий качества, заданный выражением (6).

Таким образом, алгоритм оптимизации сводится к последовательному исследованию области Ω и поиску такого набора параметров, при котором достигается минимальное значение целевой функции [5].

Для формализации и наглядного описания работы алгоритма ниже приведён псевдокод многостадийного сеточного поиска с адаптивным сужением диапазонов.

```
Задать начальные диапазоны параметров Kp, Ki, Kd
Задать число стадий оптимизации
Для каждой стадии:
Сформировать сетку значений Kp, Ki, Kd в текущих диапазонах
Для каждой комбинации (Kp, Ki, Kd):
Выполнить моделирование замкнутой системы
Если система неустойчива или нарушены ограничения:
Исключить комбинацию
Иначе:
Вычислить значение критерия качества J
Определить комбинацию параметров с минимальным J
Сузить диапазоны Kp, Ki, Kd вокруг найденного оптимума
Вернуть оптимальные значения параметров Kp, Ki, Kd
```

Алгоритм 1. Псевдокод многостадийного сеточного поиска с адаптивным сужением диапазонов параметров ПИД-регулятора

Приведённый алгоритм отличается простотой реализации, отсутствием требований к вычислению градиентов и устойчивостью к нелинейному характеру критерия качества. Это делает его удобным для применения в инженерных задачах и при разработке программных средств настройки регуляторов.

В разработанном программном приложении предусмотрена возможность интерактивной настройки параметров алгоритма оптимизации. В разделе «Оптимизация» пользователь может задавать:

- число стадий оптимизации;
- размеры сетки на каждой стадии;
- диапазоны изменения коэффициентов K_p, K_i, K_d.

Показаны параметры алгоритма оптимизации, определяющие глубину поиска и вычислительную сложность.

Наличие данного интерфейса позволяет адаптировать алгоритм под требования конкретной задачи управления, варьируя компромисс между точностью оптимизации и временем вычислений.

Вычислительная сложность алгоритма определяется количеством прогонов моделирования, которое на каждой стадии равно произведению размеров сетки по параметрам K_p, K_i и K_d. В реализованной конфигурации использование нескольких стадий с умеренными размерами сетки позволяет существенно сократить общее число вычислений по сравнению с полным перебором при сохранении качества найденного решения.

Алгоритм является полностью воспроизводимым, поскольку при фиксированных диапазонах параметров, шагах сетки и параметрах объекта управления результаты оптимизации не зависят от случайных факторов.

Таким образом, разработан алгоритм оптимизации параметров ПИД-регулятора, формализованный в виде многостадийного сеточного поиска и реализованный в программном приложении с пользовательским интерфейсом. На следующем этапе проводится вычислительный эксперимент, направленный на оценку эффективности алгоритма и сравнение базовой и оптимизированной настройки регулятора.

Экспериментальные исследования проведены методом математического моделирования замкнутой системы управления с ПИД-регулятором и апериодическим объектом второго порядка. Целью эксперимента является оценка эффективности предложенного алгоритма оптимизации параметров регулятора и сравнение результатов базовой и оптимизированной настройки по ключевым показателям качества управления.

Моделирование выполнялось при следующих параметрах объекта управления:

$$T_1 = 1.0, T_2 = 0.5, \quad (8)$$

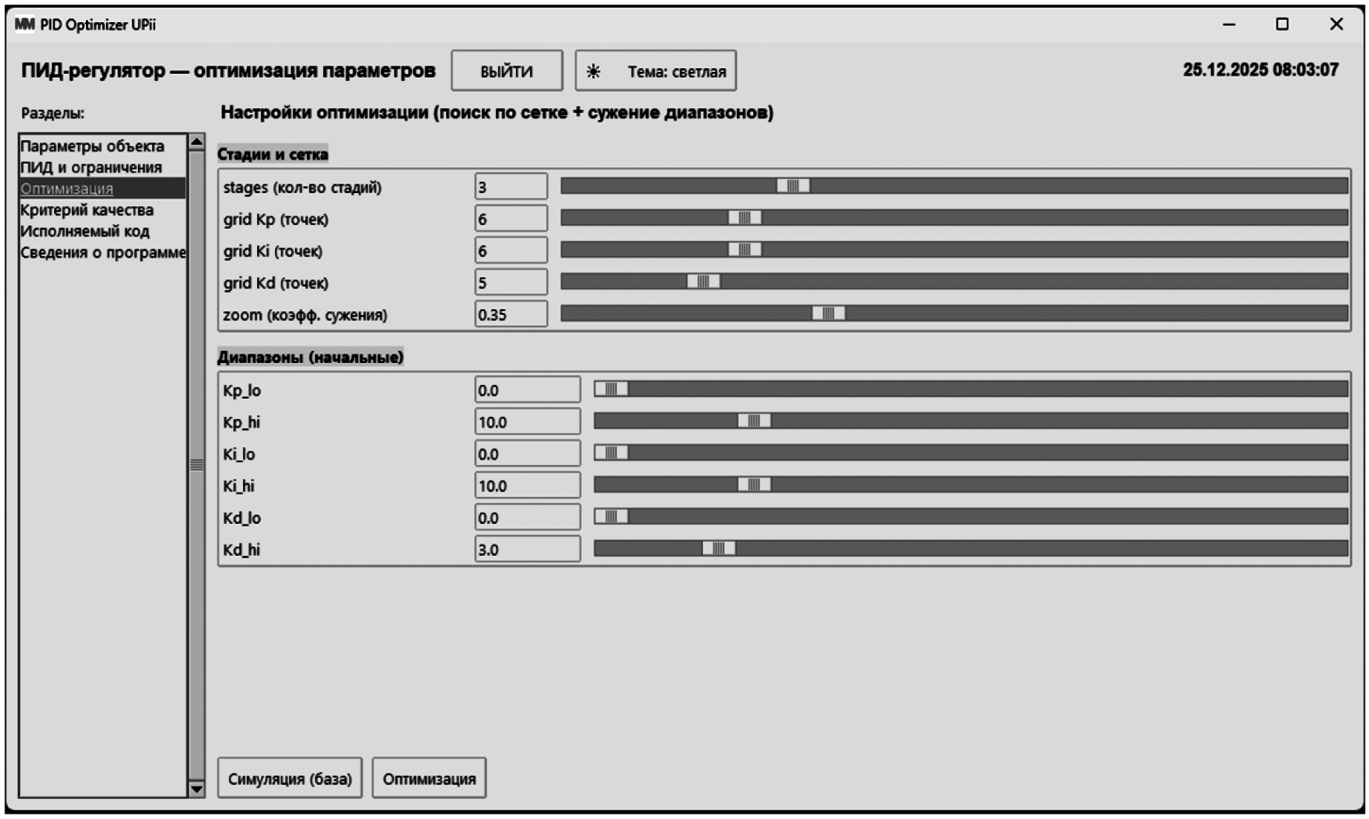


Рис. 5. Раздел «Оптимизация»: настройка параметров многостадийного сеточного поиска

шаг дискретизации по времени составлял

$$\Delta t = 0.01 \text{ с}, \tag{9}$$

а длительность моделирования —

$$T = 10 \text{ с}. \tag{10}$$

В качестве задающего воздействия использовался единичный скачок (unit step):

$$r(t) = 1. \tag{11}$$

Базовая настройка ПИД-регулятора была задана следующими значениями коэффициентов:

$$\left(K_p, K_i, K_d\right) = \left(2.0, 1.0, 0.2\right). \tag{12}$$

Оптимизация параметров выполнялась с использованием алгоритма, при фиксированных параметрах критерия качества и ограничениях на управляющее воздействие.

Результаты моделирования и оптимизации отображаются в отдельном окне результатов программного приложения. Базовая визуализация переходных процессов представлена на рисунках 6 и 7 для светлой и тёмной тем оформления интерфейса соответственно.

Отображены переходная характеристика $y(t)$, управляющее воздействие $u(t)$, ошибка регулирования $e(t)$ и сравнение коэффициентов ПИД-регулятора.

Визуализация результатов адаптирована под тёмную цветовую схему интерфейса.

Для более детального анализа предусмотрен расширенный режим отображения графиков, обеспечивающий удобство сравнения переходных процессов и масштабирование области отображения.

Показан режим детального анализа результатов моделирования.

Помимо графической визуализации, программное приложение предоставляет численные значения метрик качества управления и служебные диагностические сообщения. Данные результаты отображаются на вкладке «Вывод».

Отображены рассчитанные метрики качества и сообщения контроля вычислений.

В процессе выполнения оптимизации реализована индикация прогресса вычислений, что позволяет пользователю контролировать состояние длительных расчётов.

Показан режим выполнения оптимизации с отображением процента готовности.

Итоговые значения метрик качества для базовой и оптимизированной настройки ПИД-регулятора приведены в таблице 1.

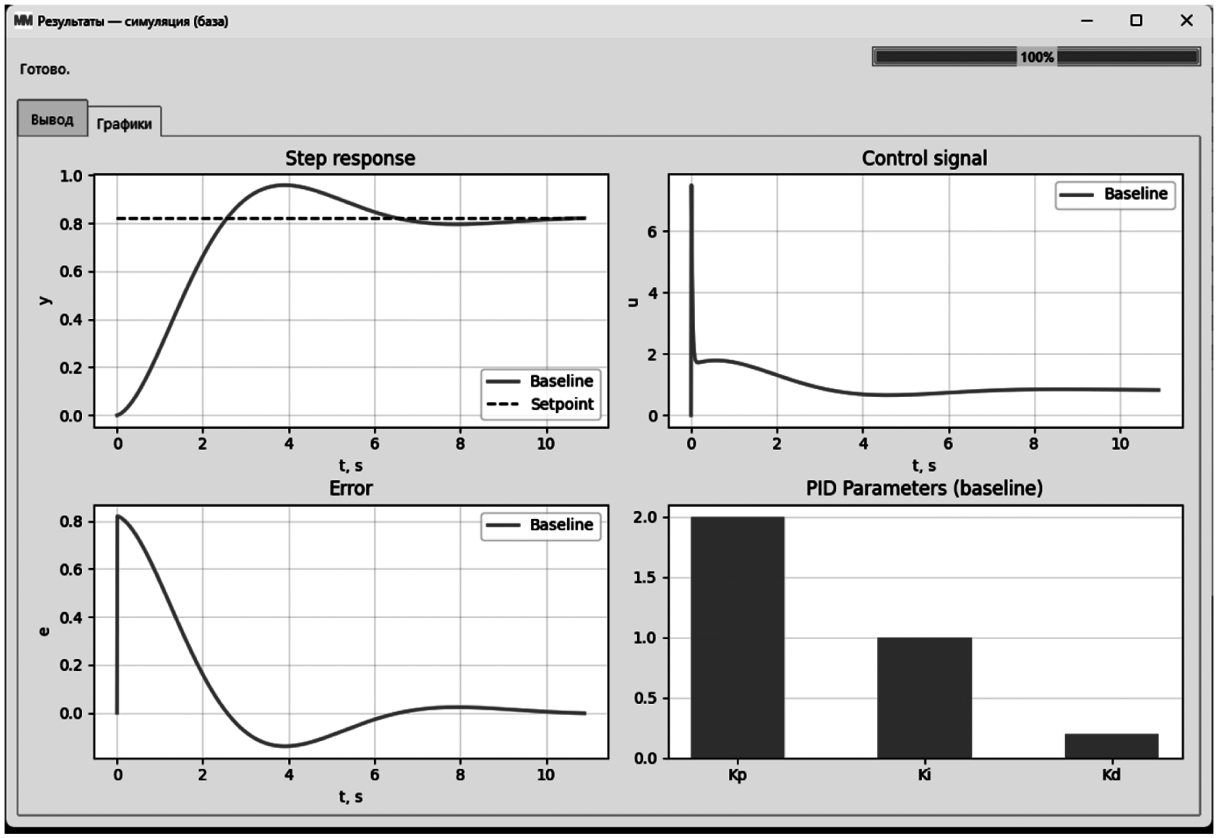


Рис. 6. Окно результатов: базовые графики моделирования в светлой теме

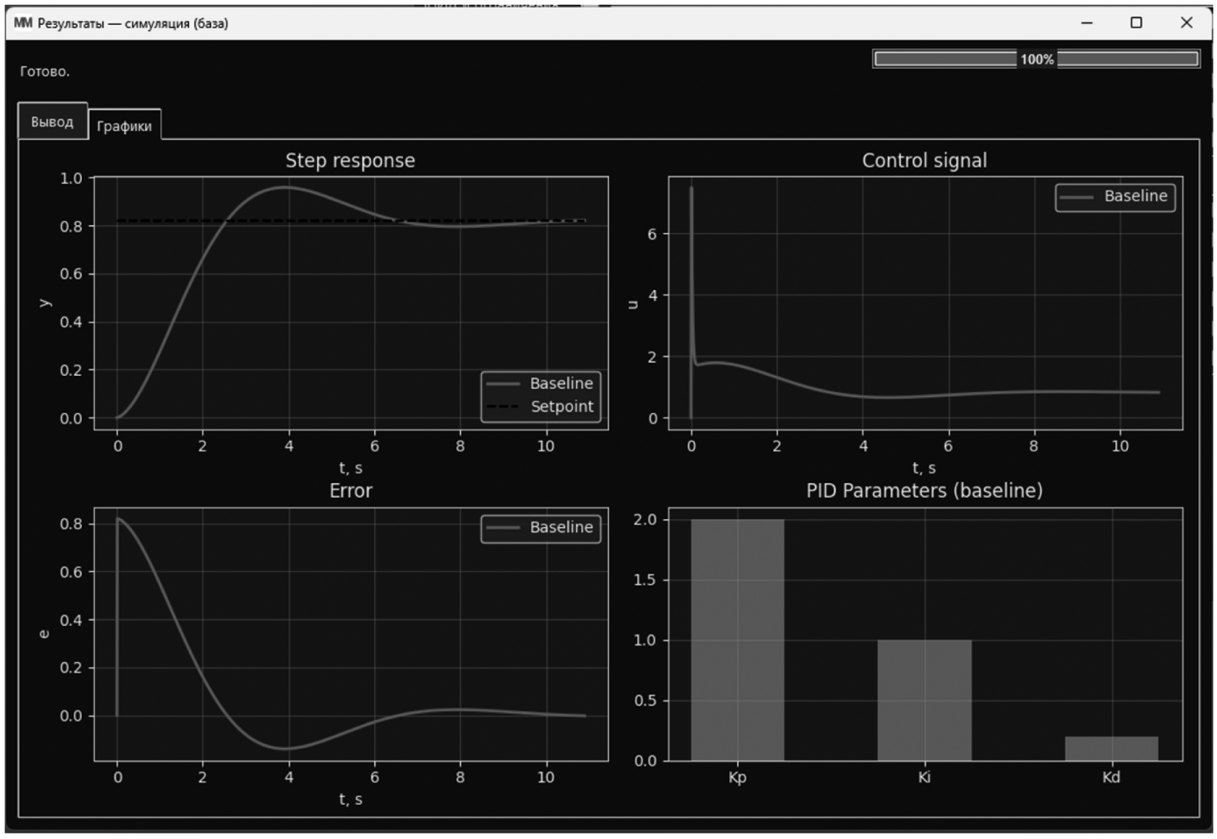


Рис. 7. Окно результатов: базовые графики моделирования в тёмной теме

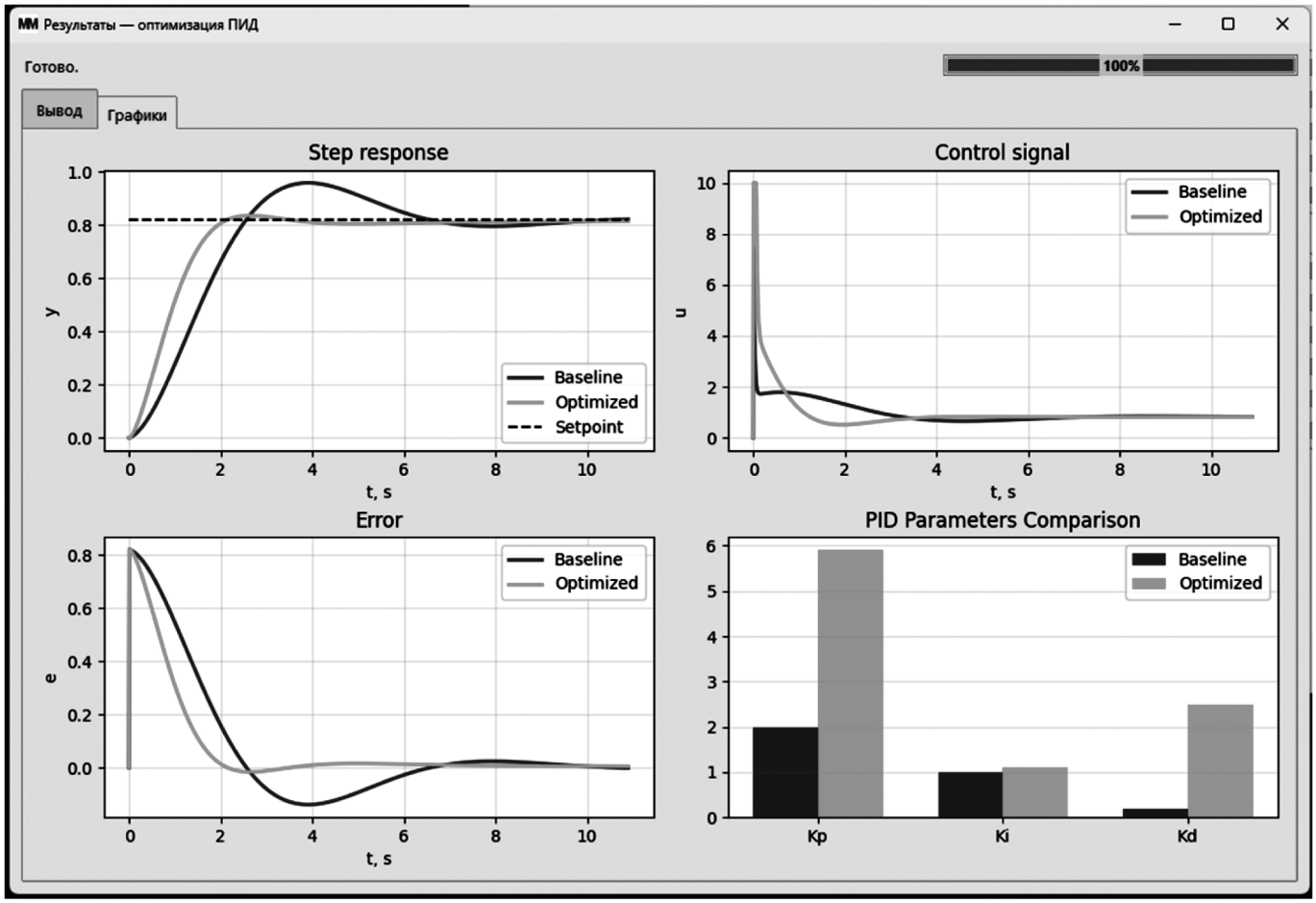


Рис. 8. Окно результатов: расширенная визуализация графиков

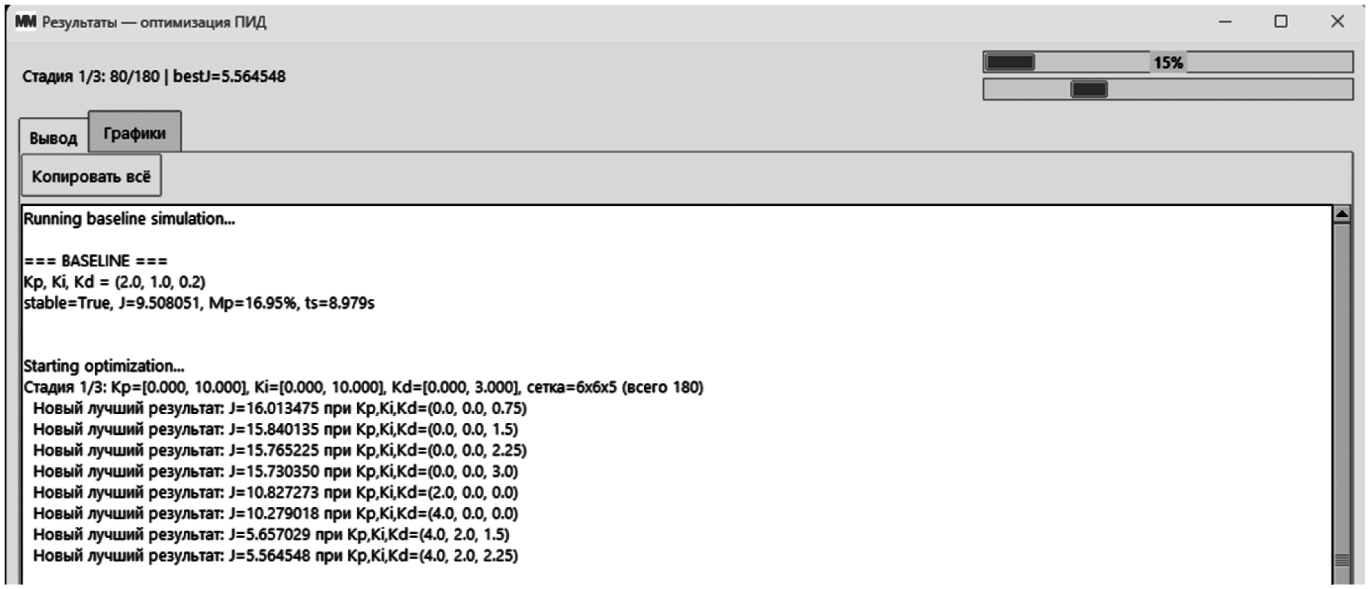


Рис. 9. Окно результатов, вкладка «Вывод»

Для базовой настройки система характеризуется отсутствием перерегулирования, однако демонстрирует сравнительно длительное время установления. После применения алгоритма оптимизации время установления сократилось более чем в четыре раза, при этом перерегулирование составило 3.04 %, что не превышает допустимого уровня [1,3].

Итоговый вывод для базовой симуляции и пример выполнения оптимизации с анализом результатов представлены на рисунках 11 и 12 соответственно.

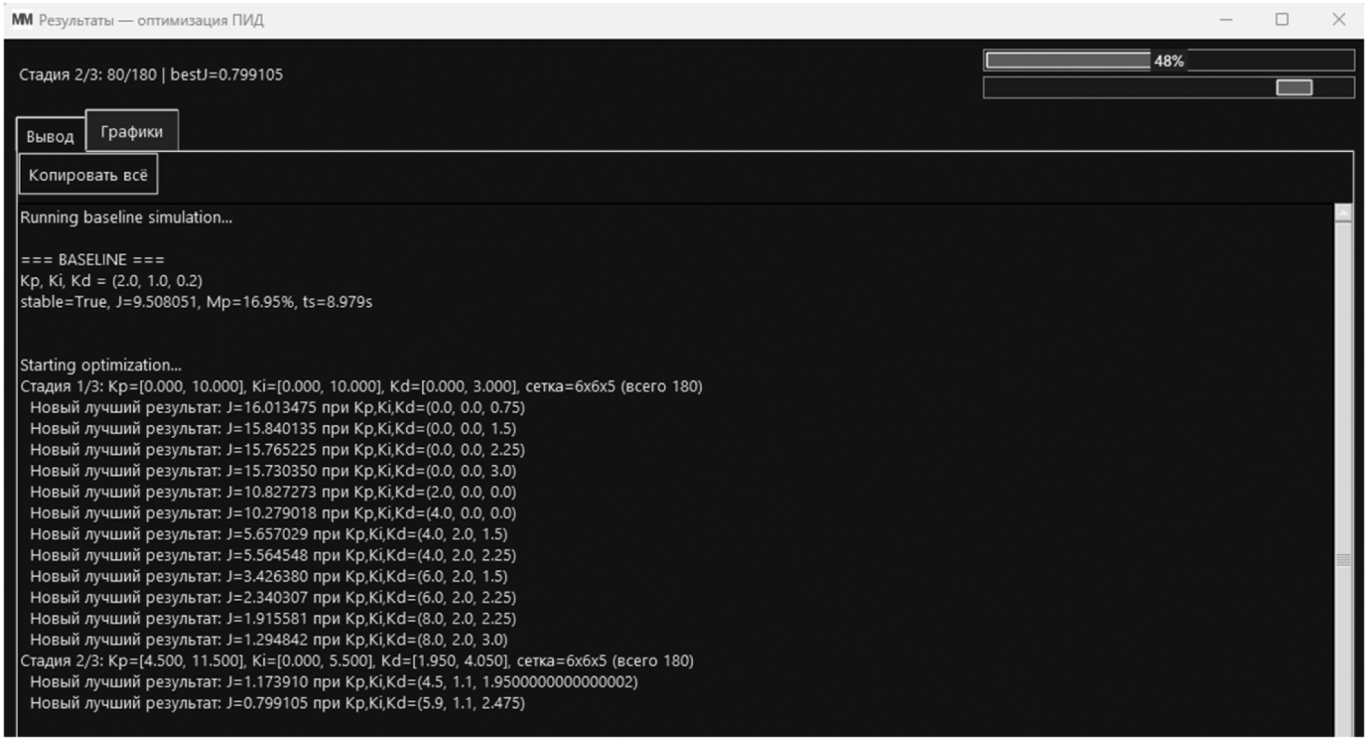


Рис. 10. Процесс вычисления: индикация прогресса и анимация загрузки

Таблица 1.

Сравнение показателей качества управления

Настройка	K_p	K_i	K_d	J	M_p,%	t_s,с
Базовая	2.00	1.00	0.20	2.718722	0.00	5.98
Оптимизированная	5.41	2.81	0.975	0.650185	3.04	1.48

Представлены значения метрик качества для исходных параметров регулятора.

Показаны улучшенные параметры ПИД-регулятора и соответствующие показатели качества.

Анализ полученных результатов показывает, что предложенный алгоритм оптимизации обеспечивает существенное улучшение динамических характеристик системы управления. Значение интегрального критерия качества уменьшилось более чем в четыре раза, а время установления сократилось с 5.98 с до 1.48 с.

Небольшое увеличение перерегулирования компенсируется значительным ростом быстродействия системы и остаётся в пределах допустимых значений. Использование ограничений на управляющее воздействие и механизма anti-windup обеспечивает устойчивость моделирования и предотвращает возникновение неустойчивых режимов.

Таким образом, результаты вычислительного эксперимента подтверждают эффективность предложенного алгоритма оптимизации параметров ПИД-регулятора и демонстрируют практическую применимость разработанного программного инструмента.

В настоящей работе разработан и исследован алгоритм оптимизации параметров ПИД-регулятора для апериодического объекта второго порядка. Алгоритм основан на минимизации расширенного интегрального критерия качества, учитывающего не только ошибку регулирования, но и показатели перерегулирования, времени установления и энергию управляющего воздействия. Такой подход позволяет более полно учитывать требования к качеству переходного процесса по сравнению с использованием одного интегрального критерия.

Предложенный алгоритм реализован в виде многостадийного сеточного поиска с адаптивным сужением диапазонов параметров. Это обеспечивает воспроизводимость результатов, устойчивость работы алгоритма и приемлемую вычислительную сложность без использования сложных методов глобальной оптимизации. В алгоритме также реализована отбраковка неустойчивых режимов, что повышает надёжность вычислительного эксперимента.

В рамках работы создан программный комплекс с графическим пользовательским интерфейсом, позволяющий интерактивно задавать параметры объекта управления, регулятора, критерия качества и алгоритма оптимизации, а также визуализировать результаты моделирования. Наличие интерфейса повышает нагляд-

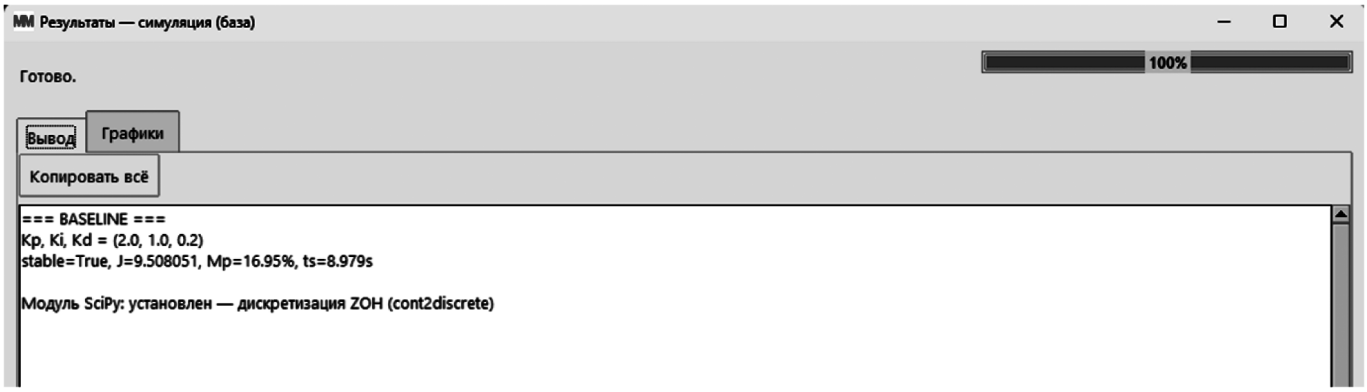


Рис. 11. Итоговый вывод для базовой симуляции

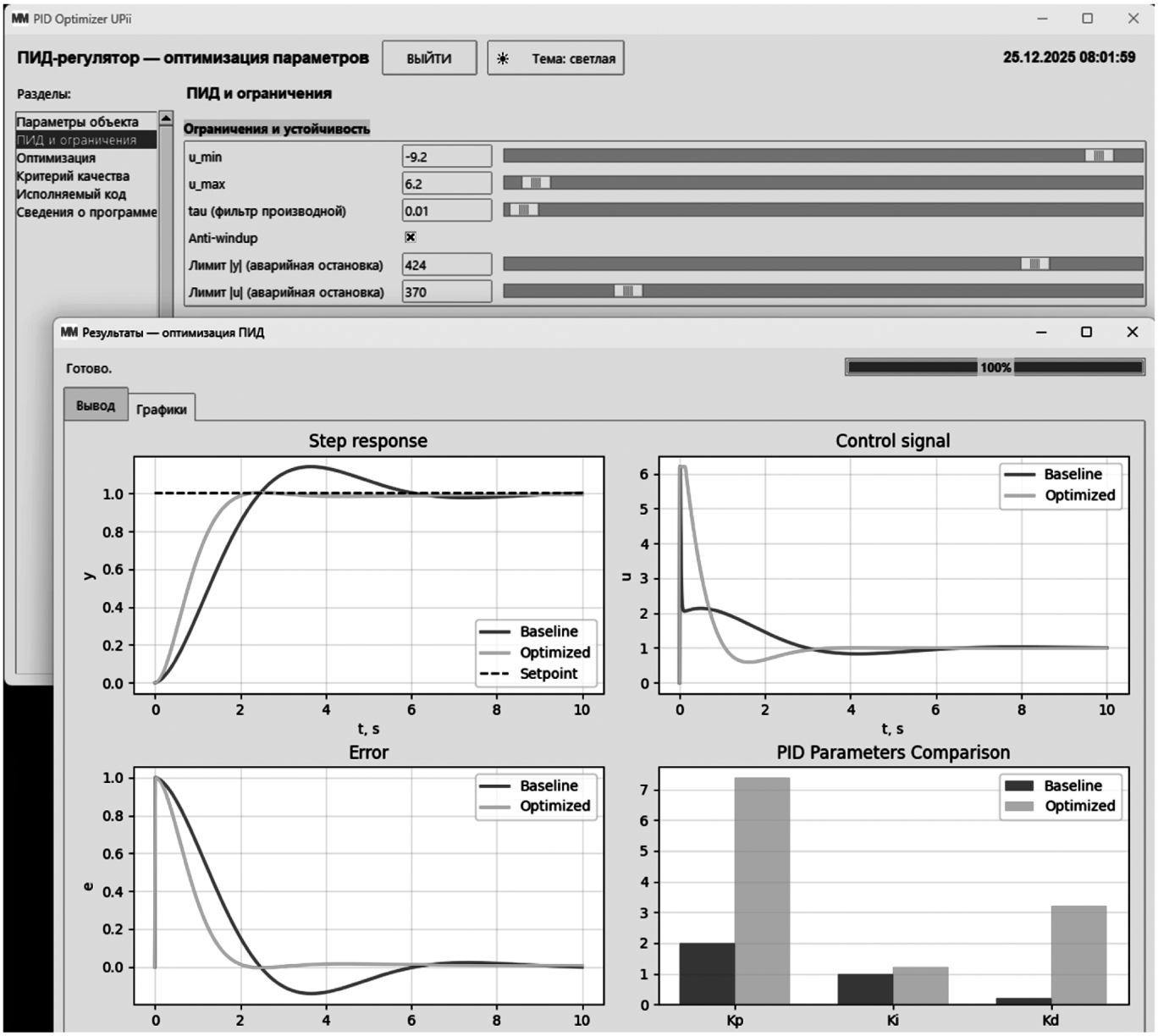


Рис. 12. Пример оптимизации: анализ результатов оптимизации

ность исследования, упрощает анализ переходных процессов и делает программный инструмент удобным для практического использования.

Результаты вычислительного эксперимента показали, что применение предложенного алгоритма оптимизации позволяет существенно улучшить динамические характеристики системы управления. В частности, время установления переходного процесса было сокращено более чем в четыре раза при сохранении устойчивости системы и допустимого уровня перерегулирования. Значение интегрального критерия качества также существенно уменьшилось по сравнению с базовой настройкой ПИД-регулятора.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанного программного инструмента на этапе проектирования и предварительной настройки систем автоматического управления, а также в учебных и исследовательских целях. Предложенный подход не требует применения физического оборудования и может быть легко адаптирован для объектов с иными параметрами или дополнительными ограничениями.

В качестве направлений дальнейших исследований можно отметить расширение алгоритма на объекты более высокого порядка, учёт запаздывания в канале управления, а также исследование робастности оптимизированных параметров при изменении характеристик объекта управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nise N.S. Проектирование систем автоматического управления. — 8-е изд. — Хобокен: Wiley, 2020. — 944 p.
2. Franklin G.F., Powell J.D., Emami-Naeini A. Системы управления с обратной связью динамических систем. — 8-е изд. — Бостон: Pearson, 2019. — 896 p.
3. Dorf R.C., Bishop R.H. Современные системы управления. — 13-е изд. — Бостон: Pearson, 2017. — 1104 p.
4. Seborg D.E., Edgar T.F., Mellichamp D.A., Doyle F.J. Динамика и управление технологическими процессами. — 4-е изд. — Хобокен: Wiley, 2016. — 512 p.
5. Visioli A. Практическое применение ПИД-регуляторов. — 2-е изд. — Лондон: Springer, 2019. — 362 p.
6. Åström K.J., Hägglund T. Современные методы ПИД-регулирования. — Research Triangle Park: ISA, 2006. — 460 p.
7. Воронов А.А. Теория автоматического управления: в 2 т. Т. 1. Линейные системы. — М.: Высшая школа, 2009. — 367 с.
8. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. — 4-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Профессия, 2017. — 752 с.
9. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1: Линейные системы. — 3-е изд. — М.: Физматлит, 2013. — 288 с.
10. Фурман И.А. Теория автоматического управления и регулирования. — М.: Юрайт, 2020. — 384 с.
11. Солодовников В.В., Туманов А.С. Математические основы теории автоматического управления. — М.: Физматлит, 2012. — 456 с.
12. Skogestad S. Простые аналитические правила редукции моделей и настройки ПИД-регуляторов // Journal of Process Control. — 2003. — Vol. 13, No. 4. — P. 291–309.
13. Ang K.H., Chong G., Li Y. Анализ, проектирование и технологии ПИД-регулирования // IEEE Control Systems Magazine. — 2005. — Vol. 25, No. 1. — P. 50–65.

© Журавлева Марина Олеговна (marina_030405@mail.ru); Самохин Михаил Николаевич (miklesamoxin@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.09

МЕТОДЫ ПРОТОКОЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ВЕБ-РЕСУРСОВ: HTTP/2, HTTP/3 И ГЛОБАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТЕНТА

METHODS FOR PROTOCOL OPTIMIZATION OF WEB RESOURCES: HTTP/2, HTTP/3, AND GLOBAL CONTENT DISTRIBUTION

V. Zabelina
B. Goryachkin

Summary. The development of web technologies and the increasing volume of data delivered by web resources create an acute need for optimization of their performance. Traditional approaches to data transmission require evaluation of their impact on content delivery and reconsideration of architecture design in the context of multi-protocol and geographically distributed environments. This work addresses the problem of comprehensive optimization of web resources based on modern data transmission protocols, global content distribution systems, and caching strategies.

A detailed analysis of the evolution of data transmission protocols and their impact on web resource performance has been conducted. Practical methodologies for implementing HTTP/2 and HTTP/3 have been identified, with justification for selection based on target audience and network interaction conditions. The impact of CDN and Origin Shield usage on global performance indicators has been investigated, and optimal caching strategies for various content types have been proposed.

Keywords: HTTP/2, HTTP/3, QUIC, data transmission protocols, Content Delivery Network (CDN), Origin Shield, Core Web Vitals, Largest Contentful Paint (LCP), Interaction to Next Paint (INP), web resource performance, global content distribution, network latency, content caching, performance optimization.

Забелина Варвара Александровна
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
varvara.zabelina@bmstu.ru
Горячкин Борис Сергеевич
Кандидат технических наук, Доцент,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
bsgor@mail.ru

Аннотация. Развитие веб-технологий и увеличение объемов, отдаваемых веб-ресурсами, создают острую необходимость в оптимизации их производительности. Традиционные подходы к передаче данных нуждаются в оценке их влияния на доставку контента и переосмысление построения архитектуры в контексте многопротокольной и географически-распределенной среды. В данной работе рассматривается проблема комплексной оптимизации веб-ресурсов на основе современных протоколов передачи данных, систем глобального распределения контента и кеширования.

Проведен детальный анализ эволюции протоколов передачи данных и их влияния на производительность веб-ресурсов. Определены практические методики применения HTTP/2 и HTTP/3 с обоснованием выбора в зависимости от целевой аудитории и условий сетевого взаимодействия. Исследовано влияние использования CDN и Origin Shield на глобальные показатели производительности, предложены оптимальные стратегии кеширования для различных типов контента.

Ключевые слова: HTTP/2, HTTP/3, QUIC, протоколы передачи данных, Content Delivery Network (CDN), Origin Shield, Core Web Vitals, Largest Contentful Paint (LCP), Interaction to Next Paint (INP), производительность веб-ресурсов, глобальное распределение контента, задержка сети, кеширование контента, оптимизация производительности.

Введение

Развитие веб-технологий на протяжении последних трёх десятилетий демонстрирует постоянную эволюцию подходов к передаче данных и оптимизации сетевых соединений. Веб-приложения стали содержать сотни ресурсов (скрипты, стили, изображения, шрифты), а объёмы пользовательских данных возросли экспоненциально. Из-за этого фокус сместился на динамическую адаптацию архитектуры передачи данных к условиям сетевого взаимодействия и географическому распределению пользователей — это именно то, что обеспечивают современные протоколы и глобальные сети доставки контента

Google, анализируя миллиарды сессий, определили три ключевых метрики, известные как Core Web Vitals, которые оценивают качество пользовательского опыта и коррелируют с конверсией [1]:

- Largest Contentful Paint (LCP) — время загрузки наиболее крупного видимого элемента (целевое значение: ≤ 2,5 сек)
- Cumulative Layout Shift (CLS) — индекс неожиданных смещений содержимого (целевое значение: ≤ 0,1)
- Interaction to Next Paint (INP) — время отклика на взаимодействие пользователя (целевое значение: ≤ 200 мс)

Согласно исследованиям, страницы, соответствующие всем порогам Core Web Vitals, имели на 24 % меньше отказов пользователей во время загрузки по сравнению со страницами, которые не соответствовали этим стандартам.

Достижение высоких показателей этих метрик требует комплексного подхода, включающего правильный выбор протоколов передачи данных и оптимальную архитектуру доставки контента. В статье рассматриваются методы протокольной оптимизации и глобального распределения контента, которые требуют минимальных капитальных вложений при максимальном эффекте улучшения производительности веб-ресурсов.

Развитие веб-технологий на протяжении последних трёх десятилетий демонстрирует постоянную эволюцию подходов к передаче данных и оптимизации сетевых соединений. Когда в 1989 году Тим Бернерс-Ли создал Всемирную паутину с протоколом HTTP, веб был статичным — простые HTML-страницы, минимальные изображения, никакой интерактивности. HTTP/1.1, стандартизированный в 1997 году, был спроектирован именно для этих условий: медленные сети, простые документы, последовательная загрузка ресурсов.

Однако к началу 2010-х годов произошла кардинальная трансформация. Веб-приложения стали содержать сотни ресурсов (скрипты, стили, изображения, шрифты), а объёмы пользовательских данных возросли экспоненциально. HTTP/1.1 с его архитектурой одного соединения на ресурс и проблемой head-of-line blocking стал узким местом производительности. В 2015 году появился HTTP/2, решивший эти проблемы мультиплексированием потоков и бинарной протоколизацией. Но этого было недостаточно для мобильных сетей с высокой задержкой и потерей пакетов.

В 2022 году HTTP/3, основанный на протоколе QUIC, кардинально пересмотрел фундаментальный транспортный уровень, перейдя с TCP на UDP.

В Таблице 1 приведено рассмотрено базовое сравнение характеристик.

HTTP/1.1 — проблемы архитектуры

HTTP/1.1 использует один TCP-поток на соединение. Проблема возникает, когда требуется загрузить множество файлов: браузер должен открывать отдельное соединение для каждого ресурса или ждать завершения предыдущего запроса. Время ожидания в очереди составляет значительную часть от общего времени загрузки.

Расчёт времени загрузки при HTTP/1.1 ведется следующим образом:

$$t_{HTTP/1.1} = \sum_{i=1}^{n} \left(t_{queue_i} + t_{connection_i} + t_{download_i} \right) \qquad (1)$$

где: — t_{queue_i} — время в очереди запроса — $t_{connection_i}$ — время установления соединения — $t_{download_i}$ — время скачивания файла *i*

Таблица 1.
Сравнение характеристик HTTP/1.1, HTTP/2 и HTTP/3

Характеристика	HTTP/1.1	HTTP/2	HTTP/3
Базовый транспортный протокол	TCP	TCP	UDP (QUIC)
Год стандартизации	1997	2015	2022
Мультиплексирование	Нет (последовательное)	Да (одно соединение)	Да (оптимизированное)
Head-of-Line Blocking	Да (критическая проблема)	Да (на уровне TCP)	Нет
Компрессия заголовков	Нет	HPACK	QPACK
Ручное управление приоритетами	Нет	Да	Да (более гибкое)
Шифрование	Опционально	Опционально (TLS 1.2)	Обязательно (TLS 1.3)
Установление соединения (RTT)	1 RTT	1 RTT + TLS	0-RTT (0-RTT resumption)
Поддержка миграции соединения	Нет	Нет	Да
Скорость decompression в браузере	N/A	Базовая	До 64 % быстрее, чем gzip
Браузерная поддержка	100 %	97 %	73 % (быстро растёт)
Поддержка CDN (Content Delivery Network)	100 %	100 %	85 % и выше

HTTP/2 — решение на уровне приложения

HTTP/2 решает проблему head-of-line blocking (устранение проблемы блокировки начала очереди) на уровне приложения путём использования фреймов и потоков (streams). Множество потоков могут использовать одно TCP-соединение, что значительно сокращает количество операций установки соединения и очередей.

Ключевые улучшения [4]:

- Бинарный протокол — в HTTP/1.1 заголовки передаются как текстовые строки с повторяющимися именами и значениями в каждом запросе, для этого нужны разделители (\r\n, двоеточия, пробелы), которые занимают байты, но не несут полезной нагрузки. В бинарном фрейме часть этой структуры заменяется фиксированными полями и флагами, которые можно упаковать в несколько байт, без лишних символов (ожидаемое уменьшение размера на 10 %–20 %).

- Мультиплексирование — одновременная передача нескольких потоков
- Server Push — сервер может отправить ресурсы до того, как клиент их запросит
- HPACK компрессия заголовков — ожидаемое сжатие заголовков на 30–50% благодаря тому, что повторяющиеся поля передаются как небольшие ссылки на ранее отправленные, экономя трафик, чем повторяющиеся текстовые строки в HTTP/1.1.

Практическое улучшение времени загрузки:

$$t_{HTTP/2} = \\ = \max\left(t_{connection} + t_{handshake}\right) + \sum_{i=1}^{n} t_{download_i} + \Delta t_{overhead} \quad (2)$$

Ожидаемое сокращение времени загрузки: в среднем на 30–50 % [5] для типового веб-сайта с 50+ ресурсами.

HTTP/3 — устранение проблем TCP

HTTP/3 решает фундаментальную проблему TCP — head-of-line blocking на уровне транспорта. TCP доставляет все пакеты в строгом порядке; потеря одного пакета задерживает доставку всех последующих. QUIC (Quick UDP (User Datagram Protocol) Internet Connections), используемый в HTTP/3, использует UDP в качестве базового протокола и может обрабатывать потерю пакетов независимо для каждого потока.

Улучшения HTTP/3 над HTTP/2:

1. Нулевая задержка при повторном подключении (0-RTT)
- Клиент может отправлять данные при установлении соединения, если он подключался ранее
- Сокращение времени на 50–100 мс для повторных визитов

2. Миграция соединения
- Connection ID в QUIC позволяет серверу идентифицировать клиента без IP-адреса.
- В TCP при смене сети меняется и IP-адрес клиента из-за чего соединение разрывается и приходится устанавливать новое. В HTTP/3 даже после смены IP, клиент продолжает отправлять пакеты с тем же Connection ID, что позволяет пользователю перейти с Wi-Fi на 4G без разрыва соединения

3. Независимая обработка потоков
- Потеря пакета в одном потоке не влияет на другие
- На нестабильных сетях улучшение производительности примерно на 12–20 % по сравнению с предыдущим протоколом [7].

Несмотря на преимущества и развитие протоколов перед нами встает вопрос правильного их применения. Точный процент постоянно меняется, но примерно половина всего интернет-трафика все еще использует HTTP/1.1 из-за его широкого распространения. Однако не стоит рассматривать его использование не только из-за появления более современных методов, но и из-за наличия угрозы безопасности — HTTP desync-атаки [9] все еще возможны на данной версии протокола. На основе проведенного выше анализа протоколов подведем итог, когда стоит остаться на HTTP/2, а когда можно перейти на HTTP/3.

Лучше использовать HTTP/2 следует при следующих факторах:

- веб-сайты, работающие на всех серверах (Apache, Nginx);
- требуется максимальная совместимость (99%+ браузеров);
- стабильное проводное соединение;
- нет критичности к микросекундным задержкам.

HTTP/3 лучше использовать, если:

- мобильные приложения с частой сменой сети;
- потоковые сервисы (видео, аудио);
- API с критичным требованием к задержке (latency);
- целевая аудитория — современные браузеры (Chrome, Firefox, Safari).

Такие рекомендации по выбору обусловлены следующими ограничениями:

1. Использование HTTP/2 предполагает обязательное применение TLS, что при первоначальном подключении может добавлять порядка сотен миллисекунд к времени установления соединения.
2. Отдельные устаревшие сетевые устройства и фильтрующая инфраструктура могут ограничивать или блокировать трафик QUIC (UDP на порту 443).
3. Динамическое сжатие контента в режиме реального времени для HTTP/3 в ряде сценариев оказывается более ресурсоёмким по сравнению с обслуживанием уже закешированных сжатых объектов.

В связи с вышеизложенным можно предложить следующие решения ограничений:

1. Для снижения накладных расходов при установлении защищённых соединений целесообразно использовать TLS 1.3 с поддержкой режима 0-RTT возобновления сессии.
2. Для обеспечения доступности сервиса при неоднородной сетевой инфраструктуре рекомендуется реализовать механизм автоматического отката на HTTP/2 в случаях недоступности QUIC, а также периодически тестировать его проходимость.
3. Для уменьшения вычислительной нагрузки и задержек при передаче контента имеет смысл кешировать результаты компрессии на уровне CDN и по возможности отдавать пользователям заранее сжатые версии ресурсов.

На графиках на рисунках 1 и 2 представлена статистика по запросам используемым и поддерживающим протоколы HTTP/2 и HTTP/3 за 2019–2025 год.

Для анализа метрик производительности с применением разных протоколов был использован источник HTTP Archive 2024 [11][12], обеспечивающий репрезентативную выборку данных по реальным веб-страницам (в том числе Alexa Top-1000 — наиболее посещаемые сайты). На основе опубликованных данных формируется профиль классического высоконагруженного веб-ресурса и распределение используемых технологий. HTTP Archive предоставляет агрегированную статистику по реальным загрузкам страниц, включая медианные

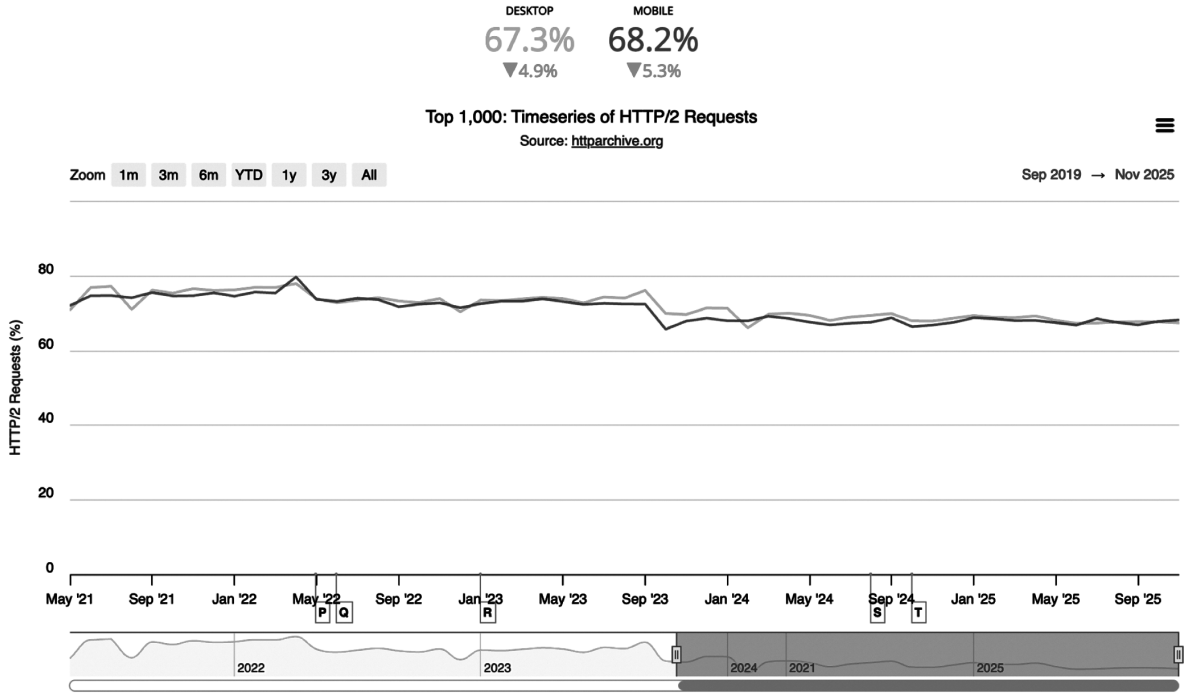


Рис. 1. Использование HTTP/2 в запросах

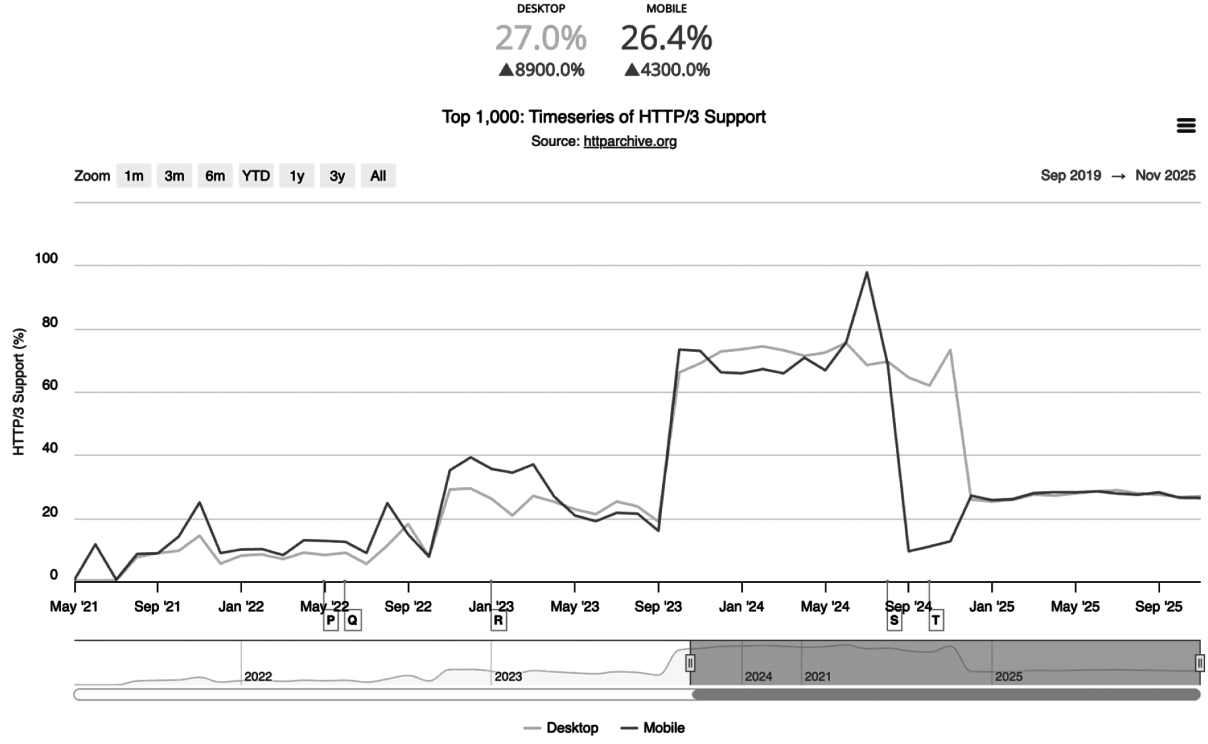


Рис. 2. Поддержка HTTP/3 для запросов

значения ключевых метрик веб-производительности для различных сетевых условий и протоколов. Относительные эффекты от перехода на HTTP/2 и HTTP/3 оценены на основе опубликованных сравнительных бенчмарков протоколов в контролируемых условиях (в частности, обзора Catchpoint по HTTP/3 vs HTTP/2 [3]).

Значения в таблице представляют собой медианные результаты для каждого протокола, основанные на опубликованных исследованиях и данных вышеуказанных источников. Оценка производительности сводится к вычислениям следующих трех ключевых метрик (таблица 2):

1. Время подключения (Connection Establishment Time) — интервал от начала установления соединения до возможности передачи данных приложения.
2. First Contentful Paint (FCP) — момент первого появления значимого содержимого (текст, изображения) в окне браузера.
3. Относительное падение производительности при потере пакетов в нестабильной 3G-сети — показатель деградации скорости загрузки при фиксированном уровне потерь.

Таблица 2.

Результаты применения разных протоколов

Метрика	HTTP/1.1	HTTP/2	HTTP/3
Время подключения (Connection Establishment Time)	250–300 мс (6–8 соединений × 40–50 мс)	80–120 мс (1 соединение) (60%ускорение)	20–40 мс (0-RTT при повторном подключении) (88 % ускорение относительно HTTP/1.1)
Время загрузки First Contentful Paint (FCP)	3.2 сек (медиана для мобильной 4G)	1.8 сек (44 % улучшение)	1.4 сек (56 % улучшение относительно HTTP/1.1)
Потеря пакетов на нестабильной сети (3G)		падение на 25–35 %	падение на 5–8 %

Content Delivery Network (CDN) — это система географически распределённых серверов, которые кешируют и доставляют контент пользователю с минимальной задержкой.

Стандартная архитектура:

- Origin Server — основной сервер, где хранится оригинальный контент
- Edge Nodes — серверы CDN, распределённые по миру
- PoP (Point of Presence) — точки присутствия CDN в разных регионах
- Intelligent Routing — система, которая направляет пользователя на ближайший edge node

Метрики производительности был получены на основе обобщения региональных бенчмарков CDN, опубликованных провайдерами CDN-услуг BlazingCDN [13] и Cloudflare [14]. В таблице 3 приведены агрегированные показатели для пяти регионов:

- медианная задержка до первого байта (First-Byte Latency) — время от отправки HTTP-запроса до получения первого байта ответа от ближайшего узла CDN; измеряется в миллисекундах;
- медианная пропускная способность (Median Throughput) — средняя скорость передачи данных при загрузке контента из CDN в данном регионе; измеряется в мегабитах в секунду (Mbps);
- доля запросов, обслуживаемых из кеша CDN (Cache Hit Ratio, CHR) — процент запросов, которые обслуживаются из кеша региональных edge-узлов без обращения к исходному серверу;
- параметр «Лучший CDN» отражает провайдера, показавшего минимальную задержку и/или максимальную пропускную способность в соответствующем регионе в опубликованных бенчмарках [13].

Таблица 3.

Меры задержки по регионам (2024)

Регион	Медианная задержка до первого байта	Медианная пропускная способность	Доля попаданий в кеш (Cache Hit Ratio)	Лучший CDN
North America	37 ms	146 Mbps	94 %	Fastly
Europe	42 ms	132 Mbps	94 %	BlazingCDN
Asia-Pacific	67 ms	98 Mbps	88 %	CloudFlare
Latin America	85 ms	76 Mbps	82 %	Limelight
Africa	120 ms	45 Mbps	76 %	Akamai

Cache Hit Ratio (CHR) — процент запросов, которые обслуживаются из кеша edge node, без обращения к origin server.

Среднее время ответа через CDN представляется как математическое ожидание двух исходов: запрос обслуживается из кеша edge-узла с вероятностью CHR или перенаправляется на origin-сервер с вероятностью (1-CHR). Тогда среднее время отклика записывается:

$$t_{avg} = \left(CHR \times t_{edge}\right) + \left(\left(1 - CHR\right) \times t_{origin}\right) \qquad (3)$$

где: — t_{edge} — время отклика от edge, — t_{origin} — время отклика от origin

Рассмотрим пример расчёта влияния на производительность. Для типичного глобального сценария при-

нимаем ориентировочные диапазоны t_{edge}=35–50 мс и t_{origin}=150–300 мс, основанные на опубликованных региональных бенчмарках CDN (BlazingCDN [13], Cloudflare [14]) и усреднённых измерениях задержки до ближайшего узла CDN и до удалённых origin-серверов. Эти значения используются как репрезентативные оценки, позволяющие показать порядок влияния роста CHR на среднее время отклика.

При CHR = 94 % и среднем трафике:

$$t_{avg} = (0.94 \times 40) + (0.06 \times 200) = \\ = 37.6 + 12 = 49.6\,\text{ms} \quad (4)$$

Без CDN (всё с origin):

$$t_{avg} = 200\,\text{ms}$$

Процент улучшения считается как относительное уменьшение времени отклика:

$$\text{Улучшение} = \frac{t_{origin} - t_{CDN}}{t_{origin}} \cdot 100\% = \\ = \frac{200 - 49{,}6}{200} \cdot 100\% \approx 75{,}2\% \quad (5)$$

Эффективная работа CDN зависит не столько от мощности инфраструктуры, сколько от правильной классификации контента и применения адаптированной стратегии кеширования. Разные типы контента имеют радикально отличающиеся характеристики изменчивости, размера и значения для пользовательского опыта. Понимание этих различий позволяет максимизировать Cache Hit Ratio и минимизировать нагрузку на origin server.

Статический контент (CSS, JS, изображения):

Такой контент можно охарактеризовать следующими признаками:

- Изменяется редко (обычно только при развёртывании новой версии приложения)
- Может быть кеширован агрессивно без риска подачи устаревшей информации
- Часто имеет versioning в имени файла (app.abc123def.js, style.hash456.css)
- Размер: от килобайт до нескольких мегабайт на файл

Сценарий для конфигурации кеширования:

TTL (Time to Live): 30 дней-1 год.

Cache Header: Cache-Control: public, max-age=31536000.

CHR: 95%+.

Для неизменяемого статического контента (CSS, JS, изображения), как правило, используется стратегия «versioned assets»: имена файлов включают хеш версии (например, app.abc123.js). При таком подходе CDN может кешировать эти файлы на edge-узлах с максимально возможным временем жизни (TTL) — вплоть до года при заголовке Cache-Control: public, max-age=31536000. Даже в случае кратковременной недоступности origin-сервера пользователи продолжают получать уже закэшированные копии ресурсов. Обновление приложения приводит к генерации файлов с новым именем (например, app.def789.js), что автоматически заставляет браузер и CDN загрузить и закешировать свежую версию.

В условиях типового веб-приложения с десятками статических ресурсов такой режим даёт очень высокий коэффициент попаданий в кеш (CHR ожидается 95% и выше). Это означает, что из 100 000 запросов к статике в день лишь около 5 000 доходят до origin-сервера, тогда как остальные обслуживаются с ближайших edge-узлах, где задержка ответа обычно составляет 35–50 мс вместо 150–300 мс при обращении к origin из статистики приведенной выше.

HTML страницы:

HTML-страницы можно охарактеризовать следующими признаками:

- Содержат динамический контент (дата обновления, отсчёт продаж, число пользователей онлайн)
- Часто персонализированы на уровне сегмента пользователей (устройство, язык, регион)
- Регулярно обновляются, но изменения не критичны в реальном времени
- Размер: 50–300 KB на страницу после сжатия

Сценарий для конфигурации кеширования:

TTL: 5-60 минут.

Cache Header: Cache-Control: public, max-age=300, s-maxage=3600.

CHR: 70–80%.

Для HTML-страниц обычно используется более консервативная политика кеширования. Cache-Control: max-age=300, s-maxage=3600 задаёт два разных интервала: max-age=300 ограничивает время жизни копии в браузерном кеше примерно пятью минутами, тогда как s-maxage=3600 разрешает прокси-кешам и CDN-узлам хранить ту же страницу до одного часа. По истечении этих интервалов включается механизм валидации: клиент или edge-узел отправляет условный запрос с заголовком If-None-Match (на основе ETag) или If-Modified-Since (на основе Last-Modified). Если контент на origin-сервере не изменился, он возвращает статус 304 Not Modified, и кешированная версия продолжает использоваться без повторной передачи полного тела ответа. В практике это позволяет достичь коэффициента попаданий в кеш (CHR) порядка 70–80 % для HTML-страниц, то есть боль-

шая часть запросов обслуживается с edge-узлов, что уменьшает добавочную задержку по сравнению с обращением к origin-серверу на сотни миллисекунд.

API ответы (JSON):

API ответов можно охарактеризовать следующими признаками:

- Часто содержат real-time данные (курсы валют, цены акций, активные пользователи)
- Могут быть полностью идентичны для группы пользователей (публичные данные) или уникальны для каждого (приватные данные)
- Размер: от 1 KB до нескольких сотен KB
- Высокая вариативность — один API может давать разные ответы в зависимости от параметров запроса

TTL: 1–5 минут.
Cache Header: Cache-Control: public, max-age=300.
CHR: 50–70 %.

В случае API-эндпоинтов кеширование на уровне CDN обычно настраивается с существенно меньшим временем жизни, чем для статического контента, поскольку ответы чаще меняются. При этом важным условием является привязка кеша к полному URL, включая строку запроса: запросы вида /api/products?category=electronics и /api/products?category=clothing должны рассматриваться как разные объекты кеша. Если интерфейс поддерживает сортировку, пагинацию и сложные фильтры, каждая уникальная комбинация параметров приводит к появлению отдельной записи в кеше, что в предельном случае может приводить к эффекту «взрыва кеша», когда число кешируемых объектов быстро растёт из-за большого количества вариантов параметров.

Для смягчения этой проблемы современные CDN-провайдеры (например, Fastly и Cloudflare) позволяют нормализовать строку запроса: исключать из неё малозначимые параметры, упорядочивать их или группировать запросы с близкими наборами параметров, тем самым уменьшая количество уникальных ключей кеша и повышая вероятность повторного использования уже сохранённых ответов. На практике грамотная конфигурация такого кеширования для API позволяет достигать коэффициента попаданий в кеш порядка 50–70 %, то есть обслуживать значительную долю запросов непосредственно с edge-узлов и тем самым уменьшать нагрузку на backend и сокращать время ответа на десятки-сотни миллисекунд по сравнению с прямым обращением к исходному серверу.

Динамический контент (user-specific):

Под динамическим контентом в данном контексте понимаются ответы, которые формируются индивидуально для конкретного пользователя: личный профиль, история заказов, персональные рекомендации и т.п. Такие данные:

- отличаются для разных пользователей и могут содержать персональную информацию;
- часто изменяются (новые заказы, изменения профиля, обновление рекомендаций);
- обычно доступны только после аутентификации и зависят от контекста сессии (cookie, токен).

В силу этих причин динамический контент, как правило, не кешируется на общих edge-узлах CDN, чтобы не допустить выдачу персональных данных одному пользователю из кеша другого. Запросы этого типа обрабатываются только origin-сервером, где уже может использоваться внутренний кеш в памяти (например, Redis или Memcached) с ключами вида user_id:profile либо более сложными комбинациями параметров (например, user_id:recommendations:category:sort_order). Для такого класса ответов коэффициент попаданий в CDN-кеш (CHR), по сути, равен нулю, поскольку каждый запрос требует обращения к origin-логике приложения.

Origin Shield представляет собой дополнительный уровень кеша между edge-узлами CDN и исходным сервером и используется для консолидации запросов к origin. В сценариях с высокой повторяемостью контента это позволяет кратно (в несколько раз) сократить число обращений [18] к исходному серверу и заметно повысить суммарный коэффициент попаданий в кеш (CHR) на уровне всей сети — вплоть до значений порядка 95–98% для наиболее часто запрашиваемых ресурсов.

Приведённый расчёт демонстрирует потенциальный эффект по достижению сокращения нагрузки (таблица 4):

Таблица 4.

Без Origin Shield	С Origin Shield
100 000 пользователей в день	
Edge CHR: 92 %	Shield CHR: 98 %
8 000 запросов проходят до origin	До origin: 160 запросов
Origin processing: 500 мс/запрос = 4000 сек нагрузки	Origin processing: 80 сек нагрузки

Процент сокращения нагрузки рассчитывается как относительное уменьшение суммарного времени обработки запросов на origin:

$$\text{Относительное сокращение нагрузки} = \frac{t_{NoShield} - t_{shield}}{t_{NoShield}} \cdot 100\% = \frac{4000 - 80}{4000} \cdot 100\% = 98\% \quad (6)$$

Для иллюстрации экономического эффекта CDN рассмотрим условный сценарий e-commerce-сайта с глобальной аудиторией. Исходные параметры выбирались

на основе типичных значений, рассмотренных выше в работе и приводимых в отраслевых отчётах о производительности и конверсии. Далее предполагаем, что подключение CDN уменьшает Time to First Byte (TTFB) для удалённых регионов с 250–300 мс до порядка 45 мс и сокращает полное время загрузки страницы примерно вдвое.

Исходные данные, взятые на основе средних оценок, рассчитанных выше:

- 100 GB статического контента
- 10 млн запросов в месяц
- 30 % из них — из дальних регионов (Africa, Asia)
- Среднее время загрузки без CDN (на основе статистик собранной HTTP Archive): 3.5 сек
- Bounce rate (показатель отказов) из-за скорости загрузки сайта [19]: 8 %

Предполагаем из медианных данных, без CDN Time to First Byte для дальних регионов:

- Network latency: 150–200 ms
- Server processing: 100 ms
- Итого: 250–300 ms
- Full page load: 3.5–4.5 сек

С учетом исходных данных: 8 % от 10 млн = 800 000 пользователей — уходят после открытия страницы и не совершают никаких действий. Тогда потеря выручки при среднем заказе в 20$: 800 000 × $20 = $16 млн в год.

Предполагаем на основе рассмотренных выше данных, что с подключением CDN (CloudFlare Pro: $200/месяц) Time to First Byte:

- Edge latency: 35–50 ms
- Cache hit: 94 %
- Итого TTFB: 45 ms (в 6х быстрее)
- Full page load: 1.2–1.8 сек (в 2х быстрее)

В данном случае теряется только: 2.5 % от 10 млн = 250 000 пользователей. Таким образом с подключением CDN предотвращена потеря: 800 000–250 000 = 550 000 пользователей. Получаем, что при среднем заказе в 20$ восстановление выручки будет: 550 000 × $20 = $11 млн в год

Годовой эффект от внедрения CDN оценивается как восстановленная выручка за счёт снижения доли отказов. Для этого высчитывается метрика ROI — это показатель окупаемости инвестиций, то есть насколько выгодным оказался проект с учётом вложенных в него средств. При стоимости CDN 200 USD в месяц расчётный ROI можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \text{ROI} &= \frac{\text{Доп. выручка - Расходы на CDN}}{\text{Расходы на CDN}} = \\ &= \frac{11000000 - (200 \times 12)}{200 \times 12} = \\ &= \frac{11000000 - 2400}{2400} = 4582 \end{aligned} \tag{7}$$

Это означает, что каждый доллар, вложенный в CDN, приносит более 4 500 долларов дополнительной выручки в год, и затраты на сервис окупаются практически мгновенно на масштабе годового трафика.

Проведённое исследование показало, что современные протоколы передачи данных и глобальные системы распределения контента являются критически важными компонентами архитектуры веб-ресурсов. Переход с HTTP/1.1 на HTTP/2 может дать улучшение производительности на 30–50 %, а использование HTTP/3 может обеспечить дополнительное ускорение на 12–20 % на нестабильных сетях.

Применение CDN позволяет снизить Time to First Byte во многих случаях на 75 % и существенно улучшить метрики Core Web Vitals для глобальной аудитории. Использование дополнительного слоя Origin Shield может снизить нагрузку на origin server до 98 %.

Ключевой вывод исследования заключается в том, что выбор протокола и архитектуры доставки контента должен быть адаптирован к профилю целевой аудитории, типу контента и условиям сетевого взаимодействия. Комбинированное применение HTTP/2 и/или HTTP/3 с CDN и Origin Shield обеспечивает оптимальное соотношение между капитальными вложениями и эффектом оптимизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Understanding Core Web Vitals and Google search results // Google Search Central. — URL: https://developers.google.com/search/docs/appearance/core-web-vitals.
2. Горячкин Б.С., Ханмурзин Т.И., 2022. Повышение эффективности работы с веб-ресурсом за счет инструментария системного программиста. Динамика сложных систем-XXI век, 16(3), p.26.
3. HTTP/3 vs HTTP/2: A Detailed Comparison // Catchpoint. — 2024. — URL: https://www.catchpoint.com/http3-vs-http2.
4. Протоколы HTTP/1.1 и HTTP/2.0: эволюция, архитектура, сравнение и практические примеры // Proselyte Software Engineering. — 2025. — URL: https://proselyte.net/http-evolution/.
5. Modern HTTP: HTTP/1.1 vs HTTP/2 For Performance // DebugBear. — 2024. — URL: https://www.debugbear.com/blog/http1-vs-http2.
6. Belshe Mike, Roberto Peon, and Martin Thomson. Hypertext transfer protocol version 2 (HTTP/2). No. rfc7540. 2015.

7. Iyengar Jana, and Martin Thomson. «QUIC: A UDP-based multiplexed and secure transport.» In RFC 9000. 2021.
8. Fielding Roy, and Julian Reschke. Hypertext transfer protocol (HTTP/1.1): Message syntax and routing. No. rfc7230. 2014.
9. HTTP/1.1 must die: the desync endgame // Port Swigger. — 2025. — URL: https://portswigger.net/research/http1-must-die.
10. Web Vitals Report 2024 // Google Search Central Documentation. — 2024. — URL: https://web.dev/vitals/.
11. Reports with dashboards. // HTTP Archive. — URL: httparchive.org.
12. HTTP. 2024 Web Almanac // HTTP Archive. — 2024. — URL: https://almanac.httparchive.org/en/2024/http.
13. Content Delivery Network Performance Benchmarks Across Regions // BlazingCDN. — 2025. — URL: https://blog.blazingcdn.com/en-us/content-delivery-network-performance-benchmarks-across-regions.
14. Network performance update: Birthday Week 2024 // Cloudflare. — 2024. — URL: https://blog.cloudflare.com/network-performance-update-birthday-week-2024/.
15. CDN Performance Metrics: Strategies for Superior Content Delivery // IoRiver. — 2024. — URL: https://www.ioriver.io/blog/cdn-performance-metrics.
16. CDN Optimization & Multi CDN Strategies // Dynadot. — 2025. — URL: https://www.dynadot.com/blog/global-cdn-strategies.
17. Cloudflare Performance Benchmarks 2024 // Cloudflare. — 2024. — URL: https://blog.cloudflare.com/radar-2024-year-in-review/.
18. AWS CloudFront Documentation: Origin Shield // Amazon Web Services Documentation. — 2024. — URL: https://docs.aws.amazon.com/AmazonCloudFront/latest/DeveloperGuide/origin-shield.html.
19. Breaking down the impact of web performance on ecommerce conversions // Noibu. — 2023. — URL: https://www.noibu.com/blog/the-impact-of-web-performance-on-ecommerce-conversions.

© Забелина Варвара Александровна (varvara.zabelina@bmstu.ru); Горячкин Борис Сергеевич (bsgor@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.11

МЕТОДОЛОГИЯ И ИНСТРУМЕНТЫ УПРАВЛЕНИЯ КОРПОРАТИВНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ ООВО

METHODOLOGY AND TOOLS FOR UNIVERSITY ENTERPRISE ARCHITECTURE MANAGEMENT

A. Kantalinskiy-Rodin

Summary. The article examines the challenges of digital transformation of higher education institutions (HEIs) through the lens of an architectural approach. The purpose of the study is to substantiate the methodological and instrumental configuration of enterprise architecture management in a university as a systemic mechanism for planning and supporting digital change. The theoretical and practical aspects of applying architectural framework models and design tools in the academic environment are analyzed.

A comparative analysis of widely used architectural approaches is conducted, demonstrating the methodological limitations of their direct comparison due to differences in their class and intended purpose. The choice of TOGAF as a de facto cross-industry standard for enterprise architecture management is substantiated, as well as the selection of ArchiMate as an architecture description language.

Enterprise architecture management (EAM) tools, including both domestic and foreign solutions, are examined. It is shown that under import substitution conditions, Western tools have limited practical applicability in Russian higher education institutions; however, they may serve as a source of functional requirements for the development of domestic solutions. An important outcome of the study is the substantiation of the need to develop a universal reference model of enterprise architecture for higher education institutions in the Russian Federation, providing a foundation for the use of architectural data regardless of the selected tools, as well as practical, practice-oriented recommendations for building an architectural practice in universities.

Keywords: digital transformation, higher education, enterprise architecture, enterprise architecture management, TOGAF, ArchiMate, Archi, reference architecture, import substitution.

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

Аннотация. В статье рассматриваются вызовы цифровой трансформации образовательных организаций высшего образования (ООВО) на основе архитектурного подхода. Цель исследования — обосновать методологическую и инструментальную конфигурацию управления корпоративной архитектурой вуза как системного механизма планирования и сопровождения цифровых изменений. Проанализированы теоретические и практические аспекты применения архитектурных рамочных моделей и средств проектирования в академической среде.

Проведён сравнительный анализ распространённых архитектурных подходов, показавший методологическую ограниченность их прямого сопоставления вследствие различия классов и назначения. Обоснован выбор TOGAF как де-факто кросс-отраслевого стандарта управления корпоративной архитектурой, а также ArchiMate как языка архитектурного описания.

Рассмотрены инструменты управления корпоративной архитектурой (Enterprise Architecture Management, EAM), включая отечественные и зарубежные решения. Показано, что в условиях импортозамещения западные инструменты имеют ограниченную практическую применимость, однако могут служить источником функциональных требований для развития отечественных решений. Важным результатом исследования является обоснование необходимости разработки универсальной референтной модели корпоративной архитектуры ООВО для РФ, обеспечивающей основу для использования архитектурных данных независимо от выбираемых решений, а также практико-ориентированных рекомендации для построения архитектурной практики в вузе.

Ключевые слова: цифровая трансформация, высшее образование, архитектура предприятия, корпоративная архитектура, управление корпоративной архитектурой, TOGAF, ArchiMate, Archi, референтная архитектура, импортозамещение.

Введение

Цифровая трансформация в последние годы приобрела системный характер и затронула все ключевые направления деятельности ООВО. Активное внедрение цифровых образовательных платформ, развитие онлайн- и гибридных форм обучения, рост объёмов данных об образовательной, научной и административной деятельности, а также повышение требований к прозрачности и управляемости со стороны государства, обучающихся и других заинтересованных лиц (стейкхолдеров) приводят к существенному усложнению организационно-технологического ландшафта университетов.

В указанных условиях традиционные подходы к управлению информационными технологиями, ориентированные на изолированное проектирование и эксплуатацию отдельных информационных систем, демонстрируют ограниченную эффективность. Результаты научных исследований и практических кейсов показывают, что цифровые инициативы в вузах нередко реа-

лизуются фрагментарно, без формирования целостного целевого образа и без устойчивой связи со стратегическими целями развития университета [1, 2]. Следствием такого подхода становятся дублирование функций, разнородность данных, рост совокупной стоимости владения информационными системами и снижение управляемости изменений.

В этой связи в научной и прикладной литературе не теряет своей актуальности концепция корпоративной архитектуры, рассматриваемой как целостное описание структуры и функционирования организации, охватывающее стратегические цели, основные виды деятельности, информационные ресурсы, прикладные системы и технологическую инфраструктуру [3, 4, 5, 10]. Управление корпоративной архитектурой (EAM — Enterprise Architecture Management) трактуется как совокупность процессов, ролей, методов и инструментов, обеспечивающих согласованное планирование и реализацию изменений на основе архитектурного подхода.

Для ООВО применение управления корпоративной архитектурой имеет выраженную специфику. Университет представляет собой сложную систему, объединяющую образовательную, научную, административную и хозяйственную деятельность, функционирующую в условиях высокой и зачастую изменчивой нормативной регламентации и характеризующуюся множеством заинтересованных сторон. Это обуславливает необходимость адаптации корпоративных архитектурных подходов к отраслевому контексту высшего образования. Внедрение корпоративной архитектуры в ООВО сопряжено с рядом специфических сложностей, обусловленных организационной спецификой университетов [12]. В отличие от коммерческих организаций с централизованной иерархической структурой, ООВО характеризуются высокой степенью децентрализации и организационного разнообразия. Эта сложность проистекает из наличия множественных автономных академических, исследовательских, административных подразделений и аффилированных организаций, каждая из которых функционирует с собственными целями, процессами и информационными системами.

Децентрализованная природа университетов создаёт значительные барьеры для внедрения целостных архитектурных решений. Каждое подразделение университета зачастую действует с определённой степенью независимости, что затрудняет применение стандартизированных подходов к управлению технологиями и процессами в масштабах всей организации. Эти различия приводят к формированию изолированных систем и процессов, которые зачастую несовместимы друг с другом и препятствуют созданию интегрированной корпоративной архитектуры.

Структура управления ООВО, включающая множественные уровни принятия решений (кафедры, деканаты, руководство отдельными институтами, финансовая служба, ректорат, ученый совет и т.д.), дополнительно осложняет внедрение архитектурного подхода. Решения, связанные с технологическими и процессными изменениями, требуют согласования различных комитетов, советов и административных органов, каждый из которых представляет интересы различных заинтересованных сторон. Это может замедлять процесс принятия решений и создавать препятствия для своевременной реализации архитектурных инициатив. Частая смена руководящих позиций в университетах может нарушать непрерывность архитектурных усилий, поскольку новые руководители могут иметь иные приоритеты или стратегические видения.

Институциональное и культурное сопротивление изменениям представляет собой ещё один существенный барьер. Университеты часто глубоко укоренены в традициях, с устоявшимися процессами и практиками, существующими десятилетиями. Эта глубоко укоренённая культура может приводить к нежеланию принимать новые технологии и процессы, особенно когда эти изменения воспринимаются как разрушающие или угрожающие существующему порядку. Профессорско-преподавательский состав может сопротивляться внедрению новых цифровых инструментов или методов обучения, предпочитая придерживаться привычных подходов. Аналогично, административный персонал может неохотно переходить на новые системы или рабочие процессы, опасаясь увеличения рабочей нагрузки или необходимости освоения новых компетенций. Это сопротивление особенно выражено в организациях, где отсутствует доверие к руководству или где предыдущие инициативы изменений потерпели неудачу или были плохо управляемы.

Ограничения ресурсов — как финансовых, так и человеческих — создают дополнительные препятствия. Разработка и поддержание эффективной архитектуры требует инвестиций, которые могут быть затруднительны в условиях ограниченных бюджетов и острой конкуренции за финансирование. Университеты вынуждены искать баланс между множеством приоритетных направлений: новые образовательные программы, исследовательские инициативы, студенческие сервисы и поддержание инфраструктуры — всё это конкурирует за зачастую ограниченные ресурсы вуза. Внедрение корпоративной архитектуры требует специализированных знаний и навыков, включая экспертизу в области бизнес- и ИТ-архитектуры, управления данными, информационной безопасности и проектного менеджмента. Однако ООВО часто сталкиваются с трудностями привлечения и удержания квалифицированных специалистов, особенно в условиях конкурентного рынка труда.

Целью настоящей статьи является обоснование методологически и практико-ориентированного подхода к управлению корпоративной архитектурой ООВО, основанного на согласованном использовании архитектурной методологии, языка архитектурного описания, инструментов управления корпоративной архитектурой и отраслевой референтной архитектурной модели с учетом минимизации рисков и указанных ранее ограничений.

Для достижения поставленной цели в статье последовательно:

— обосновывается выбор методологии управления корпоративной архитектурой;
— рассматривается выбор нотации архитектурного описания;
— проводится анализ инструментов управления корпоративной архитектурой с учётом требований технологической независимости;
— формируются рекомендации по выстраиванию практики управления архитектурой в вузе.

Методология управления корпоративной архитектурой в ООВО

В современной теории управления корпоративная архитектура определяется как интегрированное описание организации, отражающее взаимосвязи между стратегическими целями, видами деятельности, информационными ресурсами, прикладными системами и технологической инфраструктурой [6, 7]. В отличие от ИТ-архитектуры, корпоративная архитектура ориентирована на управленческий уровень и используется как инструмент согласования изменений в различных доменах организации.

Управление корпоративной архитектурой (EAM) представляет собой системную деятельность по формированию, сопровождению и использованию архитектурных артефактов в процессах стратегического, программного и проектного управления. В работах, посвящённых применению EAM в сфере высшего образования, подчёркивается, что архитектурный подход позволяет повысить прозрачность цифрового ландшафта университета, обеспечить прослеживаемость управленческих решений и связать инициативы цифровой трансформации со стратегией развития образовательной организации [1].

Для российских ООВО использование управления корпоративной архитектурой имеет ряд специфических преимуществ:

— формирование целостного представления о цифровой и организационной структуре вуза;
— снижение фрагментарности архитектурных решений для снижения общей стоимости владения информационными технологиями;
— повышение обоснованности цифровых инициатив в условиях дефицита финансирования;
— комплексная оценка цифровой зрелости, заданная законодательно;
— создание условий для сопоставимости и обмена опытом и решениями между университетами.

В качестве методологической основы управления корпоративной архитектурой в настоящей статье рекомендуется TOGAF (The Open Group Architecture Framework) [9]. Выбор данной методологии обусловлен результатами анализа научных публикаций и практических исследований в области архитектуры предприятия в сфере высшего образования.

Так, в систематическом обзоре научных публикаций по архитектурным рамочным моделям (фреймворкам) в высшем образовании, выполненном N.S. Meutia и соавторами [1], проанализированы научные работы, опубликованные в период 2010–2021 гг. По результатам анализа установлено, что методология TOGAF используется или упоминается в 87 % рассмотренных исследований, что существенно превышает частоту упоминаний других архитектурных подходов.

Схожие выводы представлены в исследовании A. Hartmann и M. von der Heyde [2], где на основе анализа практик архитектурного управления в университетах Европы и Северной Америки показано, что TOGAF применяется в качестве базовой методологии более чем в половине исследованных кейсов внедрения управления корпоративной архитектурой, тогда как альтернативные подходы используются фрагментарно или в качестве вспомогательных средств.

Центральным элементом методологии TOGAF является метод разработки архитектуры (ADM — Architecture Development Method), представляющий собой итеративную модель жизненного цикла архитектурных преобразований. ADM охватывает этапы формирования архитектурного видения, разработки архитектур доменов, определения целевых решений и планирования перехода, а также сопровождения реализации и управления изменениями.

Принципиальной особенностью TOGAF является его адаптивный характер. Методология не предписывает фиксированную архитектурную модель, а предлагает набор лучших практик и рекомендаций, подлежащих адаптации к условиям конкретной организации. Для ООВО это имеет ключевое значение, поскольку архитектурные решения должны учитывать специфику образовательной и научной деятельности, организационную структуру и нормативную среду.

По своей логике ADM соответствует базовым принципам системного подхода к управлению изменениями:

анализ текущего состояния («как есть»), формирование целевого состояния («как должно быть») и разработка плана перехода. Это делает TOGAF методологически универсальной и применимой для управления корпоративной архитектурой в ООВО, как и в любой другой организации.

Необходимо отметить, что в научных исследованиях, посвящённых архитектуре предприятия, на протяжении многих лет сохраняется устойчивая практика сопоставления различных архитектурных фреймворков, включая TOGAF, Zachman Framework, FEAF и ряда других подходов. Подобные сравнения регулярно встречаются как в обзорных работах, так и в прикладных исследованиях, посвящённых выбору архитектурной методологии для образовательных организаций [1, 3, 6].

При этом в ряде публикаций данные модели рассматриваются как альтернативные и взаимозаменяемые, без явного указания на различия их методологической природы и функционального назначения. Такой подход приводит к методологическим искажениям, поскольку сравниваются архитектурные конструкции, относящиеся к различным классам архитектурных средств и предназначенные для решения принципиально разных задач.

Zachman Framework, предложенный Дж. Захманом, представляет собой классификационную схему архитектурных представлений (таксономию), ориентированную на систематизацию архитектурных артефактов по измерениям и уровням абстракции [8]. Данный фреймворк не содержит процессной модели управления изменениями и не описывает жизненный цикл архитектуры. В этом смысле Zachman Framework не может рассматриваться как альтернатива TOGAF, а относится к иному классу архитектурных средств. Отметим, что автору неизвестны реальные примеры практического применения рамочной модели Захмана в российской практике управления корпоративной архитектуры.

FEAF (Federal Enterprise Architecture Framework) и родственные ему архитектурные подходы разрабатывались для задач государственного управления. Их структура и терминология отражают специфику государственного сектора и не предполагают универсального применения в автономных организациях. Отраслевые архитектурные фреймворки, такие как DoDAF (Department of Defense Architecture Framework) и MoDAF (Ministry of Defence Architecture Framework), разрабатывались для оборонного и военно-промышленного контекста и ориентированы на управление сложными техническими системами с высокой степенью формализации. Их применение вне целевого отраслевого контекста требует значительных методологических адаптаций и, как правило, не является оправданным для других организаций.

Таким образом, сохраняющаяся в исследовательской среде практика прямого сравнения TOGAF с Zachman Framework, FEAF и отраслевыми архитектурными фреймворками является методологически некорректной. Указанные подходы относятся к различным классам архитектурных средств и не могут рассматриваться как взаимозаменяемые. TOGAF, в отличие от перечисленных конструкций, представляет собой методологию управления жизненным циклом корпоративной архитектуры, ориентированную на планирование и сопровождение изменений и допускающую адаптацию под различные организационные контексты. Это обосновывает целесообразность его использования в качестве методологической основы управления корпоративной архитектурой ООВО.

Обоснование выбора нотации корпоративной архитектуры образовательной организации высшего образования

Эффективное управление корпоративной архитектурой ООВО предполагает не только наличие методологии архитектурного управления, но и использование формализованного языка описания архитектурных объектов и их взаимосвязей. Такой язык должен обеспечивать единообразие архитектурных представлений, возможность интеграции различных доменов архитектуры и поддержку коммуникации между различными группами заинтересованных сторон.

В практике корпоративной архитектуры использование удобной и понятной нотации является одним из ключевых факторов успешного внедрения. В качестве языка архитектурного описания для ООВО в настоящей статье рекомендуется ArchiMate [14] — стандартизированная нотация моделирования корпоративной архитектуры, поддерживаемая консорциумом The Open Group. Выбор данной нотации обусловлен как методологической сопряжённостью с TOGAF, так и фактической распространённостью ArchiMate в исследованиях и практических кейсах в области архитектуры предприятия, включая высшее образование. В исследованиях, посвящённых применению архитектурных подходов в высшем образовании, отмечается, что использование ArchiMate способствует формированию единого архитектурного языка между подразделениями университета и снижает разрыв между стратегическим и операционным уровнями управления [11, 13].

Нотация ArchiMate охватывает ключевые архитектурные домены, традиционно выделяемые в корпоративной архитектуре, включая:

— стратегический и мотивационный домены;
— домен деятельности (бизнес-архитектуру);
— домен информационных ресурсов и прикладных систем;
— технологический домен.

Для ООВО это позволяет в рамках единого архитектурного описания увязывать стратегические цели развития университета с образовательными и научными видами деятельности, поддерживающими информационными системами и технологической инфраструктурой. Такая увязка особенно важна в условиях цифровой трансформации, когда изменения в одном домене неизбежно затрагивают другие.

Выбор ArchiMate в качестве языка корпоративного архитектурного описания не предполагает отказа от использования профильных нотаций и стандартов. В архитектурной практике подчёркивается, что различные нотации решают разные задачи и применяются на различных уровнях детализации [4]. Так, нотация моделирования бизнес-процессов (BPMN) целесообразна для детального описания и регламентации процессов образовательной и административной деятельности. Унифицированный язык моделирования (UML) используется при проектировании программных решений и информационных систем. Нотации семейства IDEF применяются для функционального анализа и структурирования деятельности. ArchiMate в данном контексте выполняет интеграционную функцию, обеспечивая включение результатов, полученных с использованием профильных нотаций, в корпоративную архитектурную модель университета. Такое разграничение уровней абстракции позволяет сохранить управленческую целостность архитектурных представлений и избежать смешения детализированных моделей с корпоративным уровнем архитектуры.

Несмотря на методологические и практические преимущества, в исследованиях и практических кейсах внедрения архитектурного управления в образовательных организациях отмечается, что диаграммы ArchiMate обладают высокой когнитивной сложностью для представителей управленческого уровня — членов ректората, руководителей направлений и функциональных заказчиков [2]. Данное обстоятельство связано с тем, что ArchiMate ориентирована прежде всего на профессиональных архитекторов и предполагает владение специализированным архитектурным языком. В результате архитектурные модели, будучи формально корректными и полными, не всегда могут быть непосредственно использованы в управленческих коммуникациях без дополнительной интерпретации. Это ограничение не является недостатком нотации как таковой, а указывает на необходимость разграничения задач архитектурного моделирования и задач представления архитектурной информации для различных групп пользователей.

Инструменты управления корпоративной архитектурой ООВО

Инструменты управления корпоративной архитектурой (EAM) используются для поддержки процессов формирования, хранения и анализа архитектурных описаний, а также для представления архитектурной информации различным группам заинтересованных сторон. Программные средства сами по себе не формируют управление корпоративной архитектурой, однако при наличии методологии и архитектурной модели они существенно повышают воспроизводимость архитектурных практик и управляемость изменений [5].

Для отечественных ООВО выбор инструментов управления корпоративной архитектурой определяется совокупностью факторов, включая ограниченность финансовых и кадровых ресурсов, необходимость поэтапного внедрения архитектурного подхода, требования технологического суверенитета, а также ориентацию на широкий круг потенциальных пользователей.

В качестве базового инструмента архитектурного моделирования в ООВО в настоящей статье рекомендуется Archi [15] — свободно распространяемое программное средство для построения архитектурных моделей с использованием нотации ArchiMate. Его применение позволяет формировать архитектурные описания без лицензионных затрат и использовать единый язык архитектурного описания в рамках архитектурной команды.

На мировом рынке инструментов управления корпоративной архитектурой доминируют зарубежные платформенные решения, формировавшиеся на протяжении длительного времени и аккумулировавшие значительный объём практических наработок. Согласно аналитическим материалам компании Gartner, рынок инструментов управления корпоративной архитектурой смещается от статического моделирования в сторону поддержки управленческих решений, анализа архитектурного ландшафта и интеграции с портфельным управлением и стратегическим планированием [16].

В отчёте аналитического агентства Gartner за 2025 год [17] к числу лидеров класса решений EAM отнесены решения SAP LeanIX, Bizzdesign HOPEX, Orbus Software, Ardoc, BOC Group, Avolution, что указывает на высокую зрелость данных платформ. Данные решения активно применяются в западном корпоративном секторе и формируют де-факто эталон функциональности для инструментов EAM.

В условиях геополитических рисков и стратегии импортозамещения практическое использование зарубежных инструментов в российских ООВО существенно ограничено. Риски, связанные с лицензированием, сопровождением и размещением данных за рубежом, снижают целесообразность их внедрения как в российских компаниях в целом, так и в отечественных вузах в частности. Вместе с тем функциональная зрелость западных решений представляет методологическую ценность

и может рассматриваться как источник требований и ориентиров для развития отечественных инструментов управления корпоративной архитектурой.

К отечественным программным средствам, применимым для задач архитектурного управления, относятся SILA Union (ООО «СИЛА ЮНИОН») [18], Business Studio (ООО «ГК «Современные технологии управления») [19], а также решение Knowledge Space (ООО «Интегрированные Системы Управления») [20], ориентированные на управление корпоративной архитектурой и ИТ-ландшафтом организации. Указанные инструменты обеспечивают юридическую и организационную реализуемость внедрения в РФ и поддерживают моделирование архитектурных объектов и процессов, но не являются бесплатными.

При этом анализ открытых описаний функциональных возможностей отечественных инструментов показывает, что ни одно из рассмотренных решений не содержит встроенной референтной архитектурной модели, ориентированной на специфику ООВО РФ. В результате архитектурное содержание будет формироваться каждым вузом самостоятельно, что приводит к высокой вариативности архитектурных моделей и снижает сопоставимость архитектурных решений между университетами. Таким образом, вне зависимости от выбора конкретного инструмента управления корпоративной архитектурой, ключевым ограничением архитектурного управления в вузах остаётся отсутствие отраслевого архитектурного эталона. Это обстоятельство формирует методологическое основание для разработки универсальной референтной модели корпоративной архитектуры ООВО, независимой от конкретных программных средств. Данная проблематика была подробно рассмотрена в предыдущей публикации автора [21].

Практические рекомендации для образовательных организаций высшего образования

На основе проведённого анализа и обобщения результатов исследований могут быть сформулированы следующие рекомендации для российских ООВО, планирующих внедрение или развитие архитектурной практики.

— *Начинать внедрение архитектурной практики с методологии, а не с инструмента*.

Выбор программного средства без предварительного определения методологии управления архитектурой приводит к формированию разрозненных архитектурных описаний. На начальном этапе целесообразно зафиксировать архитектурный процесс, роли и принципы, опираясь на TOGAF как адаптируемую методологическую основу.

— *Использовать корпоративный уровень архитектурного описания как управленческий, а не технический.*

При построении корпоративной архитектуры вуза следует избегать избыточной детализации и смещения фокуса в сторону проектирования отдельных информационных систем. Корпоративная архитектура должна использоваться прежде всего как инструмент управленческого анализа и принятия решений.

— *Применять нотацию ArchiMate для описания корпоративной архитектуры*

ArchiMate целесообразно использовать для описания архитектуры на корпоративном уровне, обеспечивая согласованность представлений между стратегией, деятельностью и ИТ. Детализация процессов и программных решений должна выполняться только там, где это необходимо для конкретных управленческих задач.

— *Выбирать инструменты с учётом текущей зрелости архитектурной практики.*

На ранних этапах внедрения архитектурного управления достаточно использования бесплатных инструментов моделирования, таких как Archi. По мере развития архитектурной практики вуза возможен переход на отечественные платформы управления архитектурой, но для понимания требований к этим платформам со стороны конкретного университета (функционального дефицита) рекомендуется начать с бесплатного решения.

— *Обеспечивать управленческую интерпретируемость архитектурных данных.*

Модели, создаваемые архитекторами, должны сопровождаться агрегированными представлениями, понятными руководству вуза. Это повышает практическую ценность архитектурной практики и снижает разрыв между моделированием и управленческими решениями.

— *Выстраивать управление архитектурой как непрерывный процесс, а не разовый проект.*

Управление корпоративной архитектурой представляет собой непрерывную деятельность, охватывающую всю организацию для обеспечения устойчивых улучшений. В отличие от проектного подхода с чётко определёнными сроками завершения, архитектурное управление должно интегрироваться в операционные процессы университета. Воздействие локальных изменений становится видимым для всей организации, а потенциал улучшений возникает из согласования данных, ИТ-систем и процессов, что облегчает мотивацию, идентификацию и планирование изменений в структуре и процессах

вуза. Непрерывный характер архитектурного управления означает, что архитектурные артефакты должны постоянно актуализироваться по мере изменений в университете.

— *Измерять успех архитектурных инициатив через систему метрик.*

Архитектурное управление поддерживает всю организацию в процессе изменений, делая успех прозрачным и измеримым. Целостный подход архитектурного управления означает, что метрики с различных ракурсов и уровней могут фиксироваться в рамках организационных изменений и измеряться во времени. Например, снижение совокупной стоимости владения за счет унификации нескольких однотипных систем дистанционного обучения может измеряться на протяжении нескольких лет. Отсутствие демонстрации ценности корпоративной архитектуры было одним из основных вызовов, о которых сообщали участники международного опроса архитекторов университетов [2]. Система метрик должна быть встроена в архитектурную практику с самого начала, позволяя отслеживать прогресс цифровой трансформации и обосновывать дальнейшие инвестиции в архитектурные инициативы.

— *Развивать внутренние компетенции вуза.*

Отсутствие внутренних практических компетенций является наибольшим вызовом в процессе внедрения корпоративной архитектуры в вузах [2]. Требуемые навыки корпоративных архитекторов в ООВО включают не только общие коммуникационные способности и экспертизу в методологиях архитектурного управления, но и глубокое понимание природы и миссии организаций высшего образования. Поиск квалифицированного персонала представляет собой вызов для всех университетов. Прежде всего, это означает, что архитектурная практика может формироваться из текущих сотрудников вуза, в том числе за счёт повышение квалификации через дополнительное обучение. Основным преимуществом такого подхода является то, что эти работники уже знакомы с внутренней организацией университета.

— *Внедрять поэтапный подход с выявлением критических областей.*

Внедрение корпоративной архитектуры в ООВО представляет собой сложный и ресурсоёмкий процесс, требующий тщательного планирования и исполнения. Поэтапный подход является эффективной стратегией управления этой сложностью, позволяя организациям постепенно интегрировать новые технологии и процессы, минимизируя риски и эффективно распределяя ресурсы [12]. Поэтапный подход предлагает несколько преимуществ. Во-первых, он позволяет организациям фокусироваться на высокоприоритетных областях, требующих немедленного внимания, таких как модернизация критической инфраструктуры или устранение уязвимостей безопасности, прежде чем переходить к менее срочным задачам. Во-вторых, внедряя архитектурный подход поэтапно, организации могут учиться на каждом этапе, внося корректировки и улучшения на основе обратной связи и извлечённых уроков.

— *Создавать органы коллегиального управления архитектурой с вовлечением руководства вуза.*

Одной из наиболее эффективных стратегий согласования технологий и стратегии развития через корпоративную архитектуру является внедрение органов коллегиального управления. Эти модели взаимодействия вовлекают ключевых стейкхолдеров в процессы планирования и внедрения архитектуры, выбор решений по автоматизации, обеспечивая согласованность результирующей архитектуры с миссией, видением и стратегическими целями организации. Органы коллегиального управления облегчают анализ требований разнообразных групп вуза путём создания комитетов, рабочих групп или советов, представляющих различных стейкхолдеров. Вовлекая разные заинтересованные стороны, ООВО могут формировать чувство сопричастности и приверженности архитектурной инициативе, снижая сопротивление изменениям и повышая вероятность успешного внедрения.

Данный набор рекомендаций не является исчерпывающим, но является достаточным для первоначального построения процессов управления корпоративной архитектуры в ООВО. Реализация указанных рекомендаций позволяет университету выстраивать архитектурную практику поэтапно, повышая управляемость цифровой трансформации и снижая риски фрагментарного развития информационно-технологического ландшафта.

Заключение

В настоящей статье была рассмотрена методология и инструменты управления корпоративной архитектурой ООВО в контексте цифровой трансформации. Проведённый анализ показал, что для образовательных ООВО принципиальное значение имеет корректное разграничение архитектурной практики: методологии управления архитектурой, нотации описания архитектуры и инструментального обеспечения. Методология TOGAF обоснована как универсальная рамочная модель управления жизненным циклом корпоративной архитектуры, применимая к вузовскому контексту при условии адаптации. Нотация ArchiMate показана как язык корпоративного уровня, обеспечивающий согласованное описание ключевых архитектурных доменов и поддержку анализа влияния изменений.

Анализ отечественных инструментов управления корпоративной архитектурой позволил выявить, что существующие программные средства ориентированы прежде всего на работу с архитектурными данными и визуализацию архитектурных связей, но не задают содержательное наполнение архитектуры образовательной организации. Данная проблематика была подробно рассмотрена в предыдущей публикации автора, посвящённой разработке универсальной модели корпоративной архитектуры ООВО, и в рамках настоящей статьи используется как методологическая предпосылка, а не как самостоятельный результат. Для апробации архитектурного подхода к управлению корпоративной архитектурой в большинстве отечественных ООВО функциональные возможности программного решения Archi являются достаточными.

Основной вклад настоящего исследования заключается в формировании практико-ориентированного подхода к внедрению архитектурной практики в ООВО, основанного на согласованном использовании методологии, нотации и инструментов управления корпоративной архитектурой.

В заключение важно отметить, что современные методы управления корпоративной архитектурой претерпевают значительную трансформацию под влиянием искусственного интеллекта. Современные исследования [23–25] показывают, что в архитектурных практиках происходит переход от документарных и описательных задач к непрерывному, алгоритмически поддерживаемому проактивному управлению. При этом корпоративная архитектура по-прежнему выступает системообразующим механизмом внедрения и управления ИИ, как и других технологий в организации, что в совокупности позволяет рассматривать алгоритмически поддерживаемое управление корпоративной архитектурой как устойчивый тренд, который не отменяет, а расширяет необходимость архитектурных подходов в условиях ускоренной цифровой трансформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Meutia N.S., Sulistiyani E., Budiarti R.P.N., Sari R. Enterprise Architecture Framework in Higher Education: Systematic Literature Review // Applied Technology and Computing Science Journal. — 2022. — Vol. 5. — No. 2. — P. 112–118.
2. Hartmann A., von der Heyde M. Guidelines and good practice on how to establish enterprise architecture management in higher education institutions // Proceedings of EUNIS 2024 annual congress in Athens. — 2025. — Vol. 105. — P. 162–168.
3. Ильина О.П. Стандарты и методы управления архитектурой предприятия: учеб. пособие. — СПб.: СПбГЭУ, 2023. — 108 с.
4. Цебренко К.Н. Анализ архитектуры предприятия с использованием визуальных средств моделирования // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. — 2021. — № 8–1 (59). — С. 115–118. DOI: 10.24412/2500–1000-2021-8-1-115–118.
5. Шмонин М.А. Эффективность подхода «Архитектура как код» в управлении ИТ-архитектурой предприятия // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. — 2024. — Т. 26. — № 3. — С. 42–54. DOI: 10.35330/1991–6639–2024-26-3-42-54
6. Матвеев Д.О. Современные подходы и методы анализа деятельности предприятия / Д. О. Матвеев // Прогрессивная экономика. — 2025. — № 4. — С. 209–218. — DOI 10.54861/27131211_2025_4_209. — EDN RUMWNA.
7. Ильин И.В., Лёвина А.И., Дубгорн А.С. Цифровая трансформация как фактор формирования архитектуры и ИТ-архитектуры предприятия // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. — 2019. — № 3. — С. 50–55. DOI: 10.17586/2310–1172-2019-12-3-50–55.
8. Zachman J.A. Framework for Information System Architecture // IBM System Journal. — 1987. — Vol. 26. — No. 3. — P. 276–292.
9. The Open Group. The TOGAF Standard, Version 9.2 [Электронный ресурс]. — URL: https://www.opengroup.org/togaf (дата обращения: 04.01.2026).
10. Владимиров Д.П., Заводчикова М.Г. Архитектура предприятия как основа эффективного управления изменениями // Материалы IV Международной научно-практической конференции. — Брянск, 2025. — С. 128–134.
11. Rouvrais S., Petersen S. An Architecture Framework for Higher Education // Proceedings of the 26th International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS 2024). — Angers, France: SCITEPRESS — Science and Technology Publications, 2024. — P. 739–747.
12. Byungura J.C., Hansson H. Enterprise Architecture Principles for Higher Education // International Journal of Applied Research in Social Sciences — 2024. — Vol. 6. — Issue 12.
13. Wang X.-L., Li J. Digital Transformation in Higher Education: An ArchiMate-Based Business Architecture Case Study // IEEE Access. –2024. — Vol. 12. — Art. no. 3520829. — DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3520829.
14. The Open Group. ArchiMate 3.2 Specification [Электронный ресурс]. — URL: https://www.opengroup.org/archimate-forum/archimate-overview (дата обращения: 04.01.2026).
15. Archi (ArchiMate Modelling Tool). Официальный сайт [Электронный ресурс]. — URL: https://www.archimatetool.com/ (дата обращения: 04.01.2026).
16. Gartner. Enterprise Architecture Tools Market Guide [Электронный ресурс]. — URL: https://www.gartner.com/reviews/market/enterprise-architecture-tools (дата обращения: 04.01.2026).
17. Gartner. Magic Quadrant for Enterprise Architecture Tools 2025 [Электронный ресурс]. — URL: https://www.gartner.com/en/documents/7015598 (дата обращения: 04.01.2026).
18. SILA Union. Платформа управления корпоративной архитектурой [Электронный ресурс]. — URL: https://silaunion.ru/ (дата обращения: 04.01.2026).
19. Business Studio. Система моделирования и документирования бизнес-процессов [Электронный ресурс]. — URL: https://www.businessstudio.ru/ (дата обращения: 04.01.2026).

20. Knowledge Space (IM Systems). Enterprise Architecture Management [Электронный ресурс]. — URL: https://im.systems/decision/enterprise-architecture/ (дата обращения: 04.01.2026).
21. Канталинский-Родин А.Е. Универсальная модель корпоративной архитектуры образовательной организации высшего образования // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. — 2025. (ожидает публикации)
22. ГОСТ Р ИСО 15704–2022. Моделирование и архитектура предприятия. Требования к стандартным архитектурам и методологиям предприятия. — М.: Стандартинформ, 2022.
23. Bakar N.A.A., Suib A.H., Othman A., Amdan A.A., Hassan M.A.A., Hussein S.S. Artificial Intelligence in Enterprise Architecture: Innovations, Integration Challenges, and Ethics // Proceedings of the International Conference on Innovation & Entrepreneurship in Computing, Engineering & Science Education (InvENT 2024). — 2024. — P. 578–588.
24. Kooy S.J., Piest J.P.S., Bemthuis R.H. Impact and Implications of Generative AI for Enterprise Architects in Agile Environments: A Systematic Literature Review. — 2025. — 17 p.
25. Ramdas R.G. The Algorithmic Enterprise: Formalizing the Role of AI in Enterprise Architecture Governance // Journal of Information Systems Engineering and Management. — 2025. — Vol. 10, № 63s. — P. 838–851.

© Канталинский-Родин Артем Евгеньевич (kantalinskiy@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.13

СТЕКЛЯННЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ВАЛЮТНОГО РЫНКА: АРХИТЕКТУРА И СВОЙСТВА АДДИТИВНЫХ ИНТЕРПРЕТИРУЕМЫХ МОДЕЛЕЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТОРГОВЛЕ

GLASS BOXES FOR THE FOREIGN EXCHANGE MARKET: ARCHITECTURE AND PROPERTIES OF ADDITIVE INTERPRETED MODELS IN AUTOMATED TRADING

P. Klimin

Summary. The paper considers the application of glass (intrinsically interpretable) models to the tasks of developing automated trading systems in the foreign exchange market. An architecture for building a trading robot is proposed, in which the core is a generalized additive model with tree boosting (Explicable Boosting Machine, EBM). The model is trained in Python, exported to ONNX format, and then used in the MQL5 Expert Advisor to generate trading signals in real time. It is shown that the additive representation It allows you to simultaneously ensure high-quality forecasting of the direction of price movement and a transparent decomposition of the contribution of features to each trading decision. Interpretability metrics specialized for financial time series are discussed: the stability of the forms of functions, the consistency of the signs of effects with economic intuition, and the «turnover» of factors that determine transactions. The final section connects the theoretical constructions with the practical results of testing the adviser on historical data.

Keywords: explicable AI, glass model, Explicable Boosting Machine, ONNX, MQL5, foreign exchange market, algorithmic trading, automated trading systems.

Климин Павел Юрьевич
Аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
k2x2p@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматривается применение стеклянных (intrinsically interpretable) моделей к задачам разработки автоматизированных торговых систем на валютном рынке. Предлагается архитектура построения торгового робота, в которой ядром является обобщённая аддитивная модель с бустингом деревьев (Explainable Boosting Machine, EBM). Модель обучается в среде Python, экспортируется в формат ONNX и далее используется в советнике MQL5 для генерации торговых сигналов в реальном времени. Показано, что аддитивное представление позволяет одновременно обеспечить высокое качество прогноза направления движения цены и прозрачную декомпозицию вклада признаков в каждое торговое решение. Обсуждаются специализированные для финансовых временных рядов метрики интерпретируемости: устойчивость форм функций, согласованность знаков эффектов с экономической интуицией и «оборот» факторов, обусловливающих сделки. Финальный раздел связывает теоретические построения с практическими результатами тестирования советника на исторических данных.

Ключевые слова: объяснимый ИИ, стеклянная модель, Explainable Boosting Machine, ONNX, MQL5, валютный рынок, алгоритмическая торговля, автоматизированные торговые системы.

Введение

Применение машинного обучения в алгоритмической торговле традиционно опирается на ансамбли деревьев или глубокие нейросети, которые дают высокую прогностическую точность, но фактически функционируют как «чёрные ящики». Непрозрачность логики принятия решений усложняет контроль рыночных рисков, отладку торговых алгоритмов и соответствие нормативным требованиям к объяснимости автоматизированных решений в финансовой сфере.

Параллельно развивается направление объяснимого искусственного интеллекта (Explainable AI, XAI), в рамках которого выделяется класс стеклянных моделей (glassbox models) — архитектур, изначально спроектированных так, чтобы их решения могли быть интерпретированы напрямую, без аппроксимации методами постфактум-анализа (post hoc-методы). Ключевой представитель этого класса Explainable Boosting Machine (EBM), обобщённая аддитивная модель с циклическим градиентным бустингом деревьев и автоматическим поиском взаимодействий.

Цель статьи — исследование и формальное описание «стеклянной» аддитивной модели типа Explainable Boosting Machine (EBM) в задачах анализа финансовых временных рядов, а также обоснование возможности

интеграции данной модели в программную инфраструктуру торговых советников платформы MQL5.

Постановка задачи и требования к торговым сигналам

Рассматривается временной ряд котировок валютной пары, например EURUSD, на равномерной сетке времени $t_1, t_2, ..., t_T$. Пусть C_T — цена закрытия бара в момент t.

Формируем бинарную целевую переменную $y_t = \begin{cases} 1, & C_{t+1} - C_t > 0, \\ 0, & C_{t+1} - C_t \le 0, \end{cases}$ описывающую направление следующего бара. Вектор признаков $x_t \in \mathbb{R}^p$ включает технические и волатильностные показатели, вычисленные по данным на интервале $[t - K, t]$:

- нормированные доходности $r_t = \frac{C_t - C_{t-1}}{C_{t-1}}$ и их скользящие средние;
- индикатор средней истинной волатильности ATR_t и его производные;
- осцилляторы типа RSI, стохастик;
- относительное положение цены в дневном диапазоне $\text{pos}_t = \frac{C_t - L_t^{(D)}}{H_t^{(D)} - L_t^{(D)}}$;
- категориальные признаки, отражающие состояние тренда (направление движения и т.п.).

Задача прогнозирования. Найти параметризованную модель f_θ, дающую оценку вероятности $\hat{p}_t = \mathbb{P}(y_t = 1 | x_t) = f_\theta(x_t)$ путём минимизации усреднённой логистической потери $\mathcal{L}(\theta) = -\frac{1}{N} \sum_{t \in \mathcal{I}_{\text{train}}} \left[y_t \log \hat{p}_t + (1 - y_t) \log(1 - \hat{p}_t) \right]$.

Задача формирования сигналов. Пусть $g_t = \log \frac{\hat{p}_t}{1 - \hat{p}_t}$ — логит-оценка, а $\theta_{\text{long}}, \theta_{\text{short}} > 0$ — пороги. Тогда торговый сигнал выглядит следующим образом:

$$s_t = \begin{cases} +1, & g_t \ge \theta_{\text{long}}, \\ -1, & g_t \le -\theta_{\text{short}}, \\ 0, & \text{иначе}, \end{cases}$$

Размер позиции может быть выбран пропорционально «уверенности» модели: $v_t = v_{\max} \cdot \frac{|g_t|}{\theta_{\max}} \cdot \mathbf{1}_{\{s_t \neq 0\}}$, где $\theta_{\max}$ — технический ограничитель.

К системе предъявляются одновременно требования:

Прогностическое качество. Высокие значения AUC, F1, низкая лог-потеря, положительное математическое ожидание сделок и коэффициент Шарпа на независимом периоде.

Интерпретируемость. Для каждой сделки (t, s_t) должна быть доступна декомпозиция вида $g_t = g_0 + \sum_{j=1}^{p} \phi_j(x_{t,j})$, где $\phi_j(x_{t,j})$ — вклад j-го признака в логит, именно эта сумма должна использоваться роботом как есть, без скрытых преобразований.

Прозрачное развёртывание модели (transparent deployment). Используемая в роботе модель должна совпадать с обученной моделью вплоть до значений таблиц f_j и f_{kl}, без дополнительного «ручного» кодирования формул.

Стеклянные модели на основе обобщённых аддитивных моделей

Классическая логистическая модель имеет вид

$$\hat{p}_t = \sigma\left(\beta_0 + \sum_{j=1}^{p} \beta_j x_{t,j} \right), \quad \sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}.$$

Она прозрачна: знак и величина β_j дают линейный эффект признака $x_{t,j}$ на лог-шансы. Однако для финансовых рядов линейности часто недостаточно: зависимость доходности от, например, RSI носит насыщаемый нелинейный характер, а внутренняя структура шума требует учёта взаимодействий признаков.

Обобщённые аддитивные модели (GAM)

GAM-подход обобщает линейную модель, заменяя линейный эффект произвольной одномерной функцией:

$$g(\mathbb{E}[y|x]) = \beta_0 + \sum_{j=1}^{p} f_j(x_j) \qquad (1)$$

где $g(\cdot)$ — звено (для логистической регрессии $g(p) = \log \frac{p}{1-p}$), а f_j — сглаженные функции (сплайны, деревья малой глубины и т.д.).

Функции f_j можно визуализировать в виде графиков «значение признака → вклад в логит», тем самым получая глобальные объяснения модели. При этом аддитивная структура обеспечивает строгую декомпозицию вклада по признакам.

Для задач, где важны парные взаимодействия (например, совместное поведение индикатора волатильности и трендового фильтра), вводится расширение GA^2M:

$$g(\mathbb{E}[y|x]) = \beta_0 + \sum_{j=1}^{p} f_j(x_j) + \sum_{k<l} f_{kl}(x_k, x_l) \qquad (2)$$

Explainable Boosting Machine как стеклянная модель

Explainable Boosting Machine (EBM) реализует модель вида (2), но обучает функции f_j и f_{kl} с использованием циклической схемы градиентного бустинга по деревьям решений малой глубины и бэггинга (bootstrap aggregating).

На уровне оптимизации задача может быть записана как

$$\min_{\{f_j\},\{f_{kl}\}} \frac{1}{N}\sum_t \ell\left(\begin{array}{l} y_t, \sigma\Big(\beta_0 + \sum_j f_j(x_{t,j}) + \\ + \sum_{k<l} f_{kl}(x_{t,k}, x_{t,l})\Big) \end{array}\right) + \lambda\Omega(\{f_j\},\{f_{kl}\}) \quad (3)$$

где l — логистическая потеря, Ω — регуляризатор гладкости и разреженности (контролирует число активных взаимодействий), λ — параметр регуляризации.

На практике каждая функция f_j задаётся в виде табличной ступенчатой зависимости на равномерной или квантильной сетке значений признака, f_{kl} задаётся аналогично, но на двумерной сетке узлов (x_k, x_l). При этом обучение идёт в циклах: каждое обновление изменяет одну из функций f_jили f_{kl}, что обеспечивает стабильность и независимость от порядка признаков.

Таким образом, для любого наблюдения x_t логит $g_t = \beta_0 + \sum_j f_j(x_{t,j}) + \sum_{k<l} f_{kl}(x_{t,k}, x_{t,l})$ является строго аддитивной суммой компонент, и каждую компоненту можно трактовать как вклад соответствующего фактора в торговое решение. В отличие методов постфактум-анализа (LIME, SHAP), здесь объяснение не приближённое, а совпадает с прогнозом по определению.

Архитектура интеграции модели в MQL5-советник

Для обучения модели в среде Python необходимо загрузить исторические котировки, которые загружаются через API торгового терминала, формируется выборка $\{(x_t, y_t)\}$с учётом скользящего окна и лагов.

В качестве модели EBM используется реализация ExplainableBoostingClassifier из библиотеки interpret, ее настройки включают ограничение глубины базовых деревьев (обычно 2–3), ограничение числа взаимодействийf_{kl} и бэггинг по подвыборкам для повышения устойчивости.

Для валидации результатов на выделенном тестовом периоде рассчитываются AUC, Brier-score, precision/recall и торговые метрики (матожидание сделки, коэффициент Шарпа, максимальная просадка).

Экспорт в формат ONNX

Для переноса модели в торговый робот используется стандарт ONNX, поддерживаемый многими средами и языками, включая C++ и C#, что позволяет реализовать вызов из MQL5 через внешнюю DLL.

Используется специальная утилита *ebm2onnx*, реализующая преобразование обученной EBM в ONNX-граф. Она поддерживает бинарную классификацию, экспорт вероятностей и логитов, а также экспорт локальных объяснений, то есть вектор вкладов $\phi_j(x_{t,j})$как отдельный выход модели.

Таким образом, одно обращение к модели из советника возвращает как $\hat{p}_t$, так и набор компонент $\{\phi_j\}$, непосредственно используемых в журналировании.

В MQL5 реализуется следующий цикл:

— На каждом новом баре формируется вектор признаков x_t.

— Внешняя функция (через ONNX Runtime) возвращает $\hat{p}_t$ и $\phi_j(x_{t,j})$.

— На основе g_t и выбранных порогов рассчитывается сигнал s_tи объём v_t.

Совершённые сделки логируются в файл с сохранением времени и параметров входа/выхода, значений g_t, $\hat{p}_t$ и топ-k вкладов признаков $\phi_{j_1},\ldots,\phi_{j_k}$.

В качестве примера рассматривается валютная пара EURUSD. Выборка разделяется на обучающую часть (60 %), валидационную (20 %) для подбора гиперпараметров и тестовую (20 %) для финального бэктеста.

Для избежания утечек информации разбиение производится по времени (walk-forward тестирование).

Для оценки качества прогнозов используются следующие метрики:

AUC ROC: $AUC = \int_0^1 \mathrm{TPR}\big(\mathrm{FPR}^{-1}(u)\big)du$, которая измеряет способность модели отделять растущие бары от падающих;

Brier-скор: $\mathrm{Brier} = \frac{1}{N}\sum_t (\hat{p}_t - y_t)^2$, характеризующая калибровку вероятностей, а также используется логарифмическая потеря $\mathcal{L}(\theta)$ из (3).

На тестовом интервале по сигналам модели строится кривая эквити (equity) с учётом комиссий и спреда. Рассматриваются:

— Математическое ожидание одной сделки $\mathbb{E}[R] = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} R_i$;

— Коэффициент Шарпа Sharpe $= \frac{\mathbb{E}[R] - r_f}{\sigma_R}\sqrt{252}$, где R_i — дневная доходность портфеля, r_f — безрисковая ставка, σ_R — стандартное отклонение дневной доходности;
— Максимальная относительная просадка;
— Доля прибыльных сделок и отношение средних выигрыша/проигрыша.

Предлагаются три вспомогательные метрики, учитывающие специфику торговых стратегий.

Согласованность знаков эффектов. Пусть J_{prior} — множество признаков, для которых заранее задано ожидаемое направление влияния (например, рост волатильности не должен увеличивать склонность к длинной позиции).

Определим

$$I_{\text{sign}} = \frac{1}{|J_{\text{prior}}|}\sum_{j\in J_{\text{prior}}} \mathbb{1}\left[\operatorname{sign}\left(\Delta f_j(x_j)\right) = s_j^{\text{prior}}\right],$$

где $\Delta f_j(x_j)$ измеряет изменение функции f_j при переходе от нижнего к верхнему квартилю распределения признака, а $S_t = \left\{ j : \left|\phi_j(x_{t,j})\right| \geq \alpha \cdot \max_k \left|\phi_k(x_{t,k})\right| \right\}$ — ожидаемый знак эффекта.

Стабильность форм функций во времени. Обозначим через $f_j^{(1)}$ и $f_j^{(2)}$ оценки функции f_j, обученные на двух непересекающихся отрезках истории.

Введём меру $I_{\text{stab}}(j) = 1 - \frac{\left\|f_j^{(1)} - f_j^{(2)}\right\|_2}{\left\|f_j^{(1)}\right\|_2 + \left\|f_j^{(2)}\right\|_2}$, усредняя по всем узлам сетки признака. Значения, близкие к 1, свидетельствуют о структурной устойчивости зависимости.

Оборот объяснений по сделкам. Пусть T_{trades} — множество моментов открытия сделок. Для каждой сделки t определим множество «главных» признаков $S_t = \left\{ j : \left|\phi_j(x_{t,j})\right| \geq \alpha \cdot \max_k \left|\phi_k(x_{t,k})\right| \right\}$, где $\alpha \in (0,1)$.

Тогда $I_{\text{turn}} = \frac{1}{|T_{\text{trades}}| - 1}\sum_{t_i, t_{i+1}\in T_{\text{trades}}} \left(1 - \frac{|S_{t_i} \cap S_{t_{i+1}}|}{|S_{t_i} \cup S_{t_{i+1}}|}\right)$ измеряет долю сделок, в которых доминирующие факторы резко сменяются. Слишком высокий оборот может свидетельствовать о нестабильности стратегии.

Результаты моделирования на исторических данных и их интерпретация

Использование стеклянной модели типа EBM в контексте валютного рынка даёт ряд преимуществ. Наличие явных функций f_j позволяет выявлять неадекватные зависимости (например, «чем выше спред, тем больше вероятность входа»), отслеживать деградацию модели по мере смены рыночного режима через метрику стабильности I_{stab}, а также быстро локализовать причины аномальных серий убытков, анализируя вклад ϕ_j по убыточным сделкам.

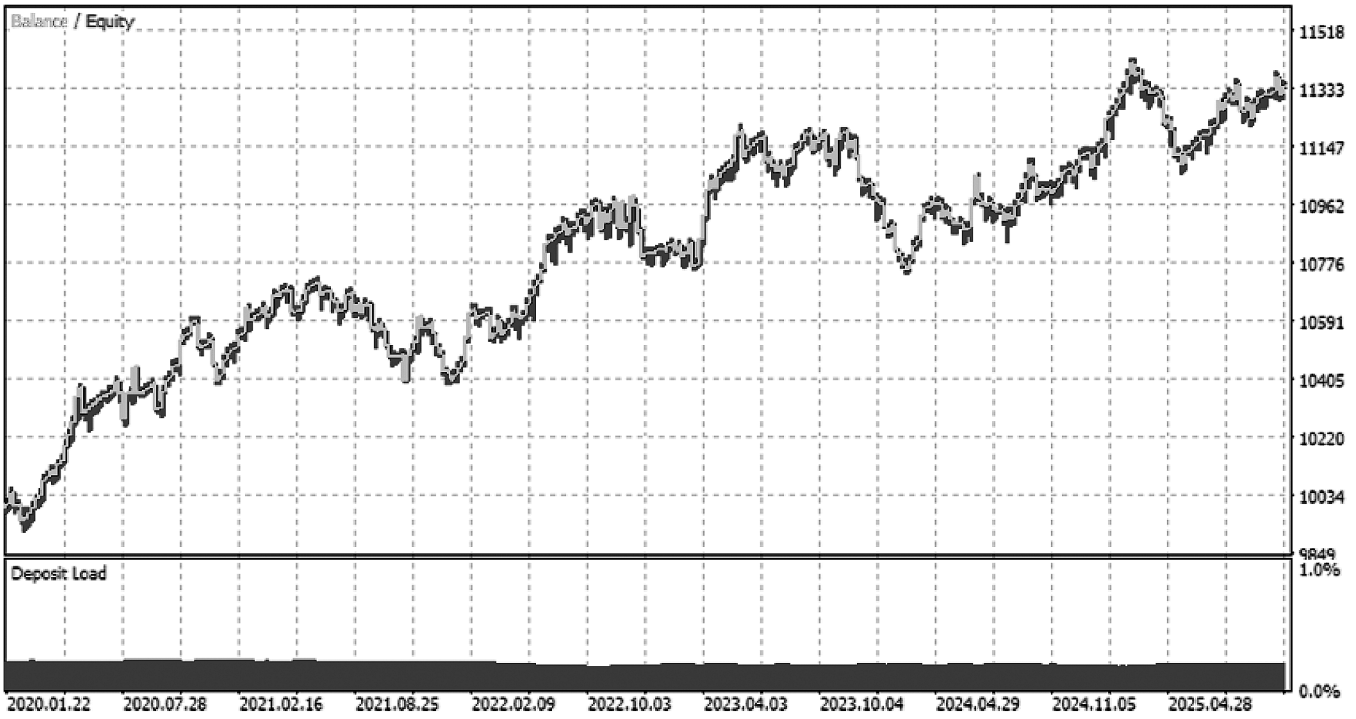
Архитектура «Python-EBM → ONNX → MQL5» отделяет исследовательскую часть от торговой, но при этом гарантирует бинарную идентичность модели: в советнике используются те же таблицы f_j и f_{kl}, что и в процессе обучения, без переписывания логики на MQL5.

Ограничения подхода связаны с необходимостью аккуратной инженерии признаков в терминале (чтобы они точно соответствовали тем, что использовались при обучении). Потенциально возможно снижение качества по сравнению с глубокими нейросетями на очень сложных задачах.

Для тестирования модели была выбрана валютная пара EUR/USD на временном масштабе M15 (один бар длиной 15 минут) за период с 2020 по 2025 года (Рис. 1). Полученные в ходе экспериментов результаты показали, что стеклянная модель с аддитивной структурой способна обеспечивать качество прогнозирования, сопоставимое с «чёрными ящиками». На ряде конфигураций наблюдалось небольшое снижение статистических метрик по сравнению с агрессивно настроенным градиентным бустингом, однако это снижение компенсировалось более устойчивым поведением на независимом периоде и меньшей чувствительностью к переобучению.

С точки зрения торговых результатов стратегия, основанная на стеклянной модели, демонстрировала положительное математическое ожидание сделок и умеренную просадку при условии консервативного выбора плеча. Более важным, однако, оказался качественный эффект: наличие детализированных объяснений по каждой сделке существенно упростило разбор аномальных периодов и позволило выявить несколько систематических сценариев, при которых модель склонна ошибаться. В большинстве таких ситуаций ключевую роль играли признаки, связанные с переходом рынка из трендового состояния во флэт или наоборот.

Интерпретируемые метрики показали, что для основной части выборки знаки эффектов признаков соответствуют экономической логике. Например, рост внутридневной волатильности обычно снижал склонность модели к увеличению размера позиции, а усиление среднесрочного тренда повышало вероятность входа в направлении тренда.



History Quality	99%				
Bars	144473	Ticks	118742953	Symbols	1
Initial Deposit	10 000.00				
Total Net Profit	1 344.16	Balance Drawdown Absolute	42.26	Equity Drawdown Absolute	75.41
Gross Profit	5 885.27	Balance Drawdown Maximal	440.87 (3.94%)	Equity Drawdown Maximal	471.47 (4.20%)
Gross Loss	-4 541.11	Balance Drawdown Relative	3.94% (440.87)	Equity Drawdown Relative	4.20% (471.47)
Profit Factor	1.30	Expected Payoff	3.80	Margin Level	42250.39%
Recovery Factor	2.85	Sharpe Ratio	1.80	Z-Score	-0.09 (7.17%)
AHPR	1.0004 (0.04%)	LR Correlation	0.92	OnTester result	0
GHPR	1.0004 (0.04%)	LR Standard Error	136.94		
Total Trades	354	Short Trades (won %)	175 (65.14%)	Long Trades (won %)	179 (69.83%)
Total Deals	708	Profit Trades (% of total)	239 (67.51%)	Loss Trades (% of total)	115 (32.49%)
	Largest	profit trade	92.92	loss trade	-83.34
	Average	profit trade	24.62	loss trade	-37.64
	Maximum	consecutive wins ($)	12 (318.10)	consecutive losses ($)	6 (-171.17)
	Maximal	consecutive profit (count)	342.64 (11)	consecutive loss (count)	-188.83 (3)
	Average	consecutive wins	3	consecutive losses	1

Рис. 1. Результаты тестирования на валютной паре EURUSD, 2020-2025 гг.

Заключение

В работе предложен целостный подход к применению стеклянных аддитивных моделей в задачах алгоритмической торговли на валютном рынке. Показано, что обобщённые аддитивные модели вида (2), реализованные в форме Explainable Boosting Machine, позволяют совместить высокую прогностическую силу с строгой аддитивной декомпозицией вклада признаков в лог-шансы торгового решения. Описана практическая схема «Python-модель → экспорт в ONNX → MQL5-советник», реализующая перенос стеклянной модели в торговый терминал без потери прозрачности и без «ручного» перекодирования формул, что критично для надёжного промышленного применения.

Предложены специализированные показатели интерпретируемости для финансовых временных рядов, дополняющие стандартные статистические и торговые метрики качества.

Тестирование на исторических данных подтверждает применимость стеклянных моделей для реальных торговых задач и демонстрирует, что отказ от «чёрных ящиков» не обязательно ведёт к существенной потере доходности. Напротив, возможность видеть, почему автоматизированная торговая система совершает сделки, создаёт основу для систематического улучшения стратегий и более ответственного использования ИИ на финансовых рынках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hastie T., Tibshirani R. Generalized Additive Models. London: Chapman & Hall, 1990. 335 p.
2. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd ed. New York: Springer, 2009. 745 p.
3. Friedman J.H. Annals of Statistics. 2001. Vol. 29. No. 5. Pp. 1189–1232.
4. Lou Y., Caruana R., Gehrke J., Hooker G. Proceedings of the 19th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM, 2013. Pp. 623–631.
5. Caruana R., Lou Y., Gehrke J., Koch P., Sturm M., Elhadad N. Proceedings of the 21st ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM, 2015. Pp. 1721–1730.
6. Doshi-Velez F., Kim B. Communications of the ACM. 2017. Vol. 60. No. 10. pp. 56–64.
7. Molnar C. Interpretable Machine Learning. 2nd ed. Munich, 2022. 320 p.
8. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge, MA: MIT Press, 2016. 775 p.
9. Tsay R.S. Analysis of Financial Time Series. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2010. 677 p.
10. Chan E. Algorithmic Trading: Winning Strategies and Their Rationale. Hoboken: Wiley, 2013. 224 p.
11. De Prado M.L. Advances in Financial Machine Learning. Hoboken: Wiley, 2018. 696 p.
12. Murphy J.J. Technical Analysis of the Financial Markets. New York: New York Institute of Finance, 1999. 576 p.

© Климин Павел Юрьевич (k2x2p@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.14

ЭМБЕДДИНГИ КАК ОСНОВА АВТОМАТИЧЕСКОГО ИНДЕКСИРОВАНИЯ НАУЧНЫХ ТЕКСТОВ КЛЮЧЕВЫМИ ТЕРМИНАМИ: АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ И СТРУКТУРНО-СЕМАНТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Комаров Иван Дмитриевич
Аспирант, Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук, г. Москва
i.komaroni@ya.ru

Аннотация. В данной статье рассматриваются особенности применения эмбеддингов в задачах автоматического индексирования научных текстов ключевыми терминами. Для анализа возможностей и ограничений эмбеддинг-ориентированных методов индексирования выделены три группы факторов: равноправие векторов, контекстная размытость, утрата структурной значимости терминов, а также предложена структурно-семантическая модель с использованием взвешенного представления терма и агрегированного вектора документа. Результаты исследования показали, что наилучшее качество и воспроизводимость индексирования достигаются при интеграции семантической близости кандидатов с учётом структуры научного текста, посредством чего обеспечивается повышение согласованности ключевых терминов в цифровых научных коллекциях.

Ключевые слова: автоматическое индексирование, эмбеддинги, ключевые термины, векторные представления, научные тексты, структурно-семантическая модель, цифровые научные коллекции.

EMBEDDINGS AS THE BASIS FOR AUTOMATIC INDEXING OF SCIENTIFIC TEXTS WITH KEY TERMS: ALGORITHMIC CONSTRAINTS AND A STRUCTURAL AND SEMANTIC MODEL

I. Komarov

Summary. This article discusses the features of embedding in the tasks of automatic indexing of scientific texts with key terms. To analyze the possibilities and limitations of embedding-oriented indexing methods, three groups of factors are identified: equality of vectors, contextual blurriness, loss of structural significance of terms, and a structural and semantic model using a weighted representation of the term and an aggregated document vector is proposed. The results of the study showed that the best quality and reproducibility of indexing is achieved by integrating the semantic proximity of candidates, considering the structure of the scientific text, thereby increasing the consistency of key terms in digital scientific collections.

Keywords: automatic indexing, embeddings, keywords, vector representations, scientific texts, structural and semantic model, digital scientific collections.

Введение

Автоматическое индексирование научных текстов в цифровых научных коллекциях относится к задачам системного анализа, поскольку результат определяется согласованием этапов представления текста, отбора признаков и принятия решения о наборе ключевых терминов, пригодном для поиска и аналитической обработки [12]. Эмбеддинги в этом смысле рассматриваются как способ перевода лексических единиц и фрагментов текста в числовую форму, что позволяет работать с семантической близостью терминов в векторном пространстве на больших массивах публикаций [10]. При включении нейросетевых моделей в обработку текстов возрастает роль формализованного описания входных данных и критериев качества индексирования, поскольку итоговая разметка ключевыми терминами используется в последующих процедурах классификации, тематического анализа и навигации по корпусу научных публикаций [6]. Эмбеддинги в данной системе выступают элементом алгоритмической инфраструктуры, обеспечивающим сопоставление семантики терминов со структурными элементами научного текста [5]. На прикладном уровне автоматическое индексирование понимается как получение списка ключевых терминов, отражающих предметное содержание документа и поддерживающих сопоставимость материалов внутри коллекции при единых правилах обработки [9]. В задачах выделения ключевых терминов контекстные эмбеддинги получили распространение потому, что связь терма с окружением повышает корректность интерпретации полисемии и терминологических вариаций в научных публикациях [11]. Сравнение документов и подкорпусов переводит индексирование на уровень цифровой научной коллекции как совокупности взаимосвязанных материалов [7].

Кроме того, наличие в корпусах разнородных по форме описаний понятий, включая графовые и иерархические структуры, усиливает значимость согласования терминов с их функциональной ролью в документе [8]. В многоязычных массивах публикаций возрастает значение сопоставления обозначений понятий и именованных сущностей, поскольку совпадение смысла не гарантируется совпадением формы записи, а семантическое выравнивание напрямую влияет на качество индексирования [9]. Автоматическое индексирование в системном анализе рассматривается как последовательность процедур, сочетающих представление текста эмбеддингами, правила отбора кандидатов и критерии выбора финального набора ключевых терминов [1-2]. Перенос эмбеддингов между предметными областями приводит к расхождению распределений и смысловых соответствий, что снижает согласованность ключевых терминов в пределах одной коллекции [4]. Проверка методов на прикладных данных показывает значимость выбора процедуры группирования и параметров представления, поскольку близость векторов зависит от предобработки и применяемой модели [3]. Для задач коллекционного уровня ориентиром служат результаты кластеризации текстов с использованием эмбеддингов больших языковых моделей, что отражает влияние типа эмбеддингов на выделение тематически однородных массивов [13].

Материалы и методы

На первом этапе исследования происходит обработка полученных исторических данных экспериментального карьера. После этого основной набор данных разделяется на наборы обучения, тестирования и проверки. Затем набор данных подвергается четырем алгоритмам машинного обучения (SVM, ANN, DT и RF) с использованием инструмента Rapid Miner. Для создания и оценки прогноза используются четыре показателя: корреляция, абсолютная ошибка, относительная ошибка и среднеквадратическое значение. Процесс настройки параметров происходит на протяжении всего исследования, чтобы обеспечить наилучшую продуктивность четырех моделей.

Исходные данные об энергопотреблении были собраны на экспериментальном карьере. Различные измерения, включая напряжение, частоту, ток, коэффициент мощности, записывались, контролировалось их динамическое изменение. Каждую секунду устанавливалось новое рекордное значение энергопотребления. Данные были собраны с 21 участка экспериментального карьера на протяжении 1 суток, всего было сделано 3008 тыс. записей. После применения программы Python для фильтрации данных осталось 26,4 тыс. записей.

Результаты и их обсуждение

Автоматическое индексирование научных текстов опирается на представление ключевых терминов как компактных маркеров содержания, пригодных для сопоставления документов в цифровых научных коллекциях. Для этой цели векторные модели заменили ранние частотные схемы представления текста, поскольку числовое кодирование слов и фраз позволяет учитывать семантическую близость терминов, а не ограничиваться их встречаемостью [10]. Концептуально важным является разграничение дискретных представлений текста и непрерывных эмбеддингов, так как в задачах индексирования в отличие от простого подсчёта слов требуется приближение к смысловому ядру документа, выраженному ключевыми терминами [12]. Развитие контекстных моделей усилило роль контекста при интерпретации терминов, особенно в научных текстах с высокой терминологической плотностью и полисемией [9].

Уточнение понятия ключевых терминов в современных методах индексирования связано с тем, что качество разметки зависит от того, какая единица текста получает векторное представление и по каким правилам формируется итоговый набор терминов. В этом поле практическую значимость приобрели основанные на использовании эмбеддингов методы выделения ключевых терминов, ориентированные на сопоставление близости фраз к смысловому центру текста [11].

Для теоретического обоснования места векторных моделей важна связь «эмбеддинги — выбор модели — воспроизводимость результата», поскольку разные семейства эмбеддингов предоставляют различающиеся пространства близости и различающиеся списки ключевых терминов при одном и том же корпусе работ [5]. Как следствие, векторные модели в современных методах индексирования рассматриваются как техническое средство смыслового сопоставления терминов, задающее рамки для последующих алгоритмических решений [6].

В задачах автоматического индексирования на основе извлечения (extractive) формирование набора ключевых терминов сводится к отбору кандидатов из текста научной публикации с последующим ранжированием по заданному критерию близости к содержанию документа.

В качестве информационной базы для ранжирования обычно применяют представления текста, полученные при векторизации, тогда как сходство кандидатов с текстом оценивают в пространстве эмбеддингов, что удобно для системного анализа за счёт прозрачной формализации входных данных и метрики сопоставления [10]. Для подходов на основе извлечения характерна зависимость результата от качества сегментации, выбора кандидатов и от того, какие элементы научного текста попадают в обработку, поэтому при сопоставлении методов целесообразно рассматривать цепочку обработки как систему взаимосвязанных процедур с контролируемыми параметрами [12].

Подходы на основе порождения (generative) ориентированы на получение ключевых терминов как результата генерации, поэтому в итоговый набор могут попадать отсутствующие в тексте, но близкие по смыслу к тематике публикации формулировки.

Для системного анализа различие с подходами извлечения выражается в смене точки контроля, поскольку в подходах порождения основной риск связан с корректностью порождённых терминов и их соответствием исходному тексту, в то время как проверка качества опирается на сопоставление с авторскими ключевыми словами и семантическими метриками сходства [11].

В процессе использования контекстных векторных представлений оценка релевантности ключевых терминов опирается на контекст, что повышает точность интерпретации полисемии, однако возрастает значение процедур проверки и ограничений на генерацию [12].

В таблице ниже даётся сравнительная оценка подходов к автоматическому индексированию на основе извлечения и порождения (табл. 1).

В эмбеддинг-ориентированных методах индексирования ключевые термины оцениваются по близости векторных представлений, при этом часто возникает эффект равноправия векторов, когда единицы текста получают сопоставимый «вес» независимо от роли в научной публикации [12]. Контекстная размытость проявляется в том, что близость векторов отражает общий тематический фон фрагмента, а граница между термином как смысловым ядром и термином как частным упоминанием различается слабо, вследствие чего в итоговый список попадают второстепенные обозначения [11]. Утрата структурной значимости терминов дополнительно связана с тем, что одинаковая лексема в аннотации, заголовке или разделе результатов получает близкие векторы, хотя для индексирования научных текстов значение таких позиций различается [10]. Для смягчения указанных ограничений в индексирование вводится взвешивание

Таблица 1.

Сравнительная характеристика методов извлечения и порождения в автоматическом индексировании научных текстов

Параметр	Извлечение	Порождение	Системный анализ
Выходной результат	Список ключевых терминов из текста	Список ключевых терминов, включая отсутствующие	Различие объекта контроля качества
Основание отбора	Кандидаты из текста	Генерация последовательности терминов	Различие источника множества кандидатов
Источник ошибок	Потеря релевантных кандидатов на этапе выделения	Появление терминов вне содержания публикации	Различие доминирующего риска
Прозрачность процедуры	Высокая интерпретируемость шагов отбора	Снижение интерпретируемости внутренних представлений	Различие управляемости параметров
Критерий ранжирования	Метрика близости кандидата и текста	Метрика качества генерации и близости к тексту	Различие схемы оценивания
Зависимость от структуры текста	Сильная зависимость от сегментации и границ фрагментов	Зависимость от представления документа в модели	Различие чувствительности к препроцессингу
Контроль терминологии	Контроль словаря за счёт ограничений на кандидатов	Контроль словаря через ограничения генерации	Различие инструмента нормализации
Метка качества	Сходство с авторскими ключевыми словами; точность отбора	Сходство с авторскими ключевыми словами; семантика	Сопоставимость метрик при едином наборе данных
Применимость к коротким фрагментам	Снижение качества при малом числе кандидатов	Повышение качества при наличии сильных контекстных представлений	Различие зависимости от объёма текста
Воспроизводимость результата	Высокая при фиксированных правилах отбора	Зависимость от стохастики генерации и параметров	Различие воспроизводимости в экспериментах
Масштабирование на коллекцию	Стабильное при унификации правил извлечения	Чувствительность к доменной вариативности коллекции	Различие рисков при росте неоднородности данных

Источник: авторская разработка

векторного представления терма с учётом его повторов и структурной позиции в тексте, что позволяет отделять терминологическое ядро от фоновых употреблений и учитывать вклад отдельных фрагментов [13]. Взвешенное векторное представление терма в общем виде можно записать формулой (1)

$$v^w(t) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i \times v_i(t)}{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i} \quad (1)$$

где: $v_i(t)$ — векторное представление терма t в i-м контексте; α_i — весовой коэффициент, отражающий значимость позиции терма в структуре научного текста; n — число контекстных употреблений терма в документе.

Особенности векторного представления терминов формируют систему алгоритмических ограничений и условий применимости эмбеддинг-методов автоматического индексирования (табл. 2).

Структурно-семантическая модель автоматического индексирования научных текстов на основе эмбеддингов предполагает раздельную обработку смысловых единиц текста и элементов структуры документа, поскольку для ключевых терминов значимость определяется не только лексическим содержанием, но и позицией в публикации [12]. Прикладная реализация опирается на поэтапное представление документа, при котором векторные представления вычисляются для фрагментов, связанных со структурой научной публикации, а затем сводятся к единому описанию документа для последующего отбора ключевых терминов [10]. При работе с цифровыми научными коллекциями значимым становится согласование уровня фрагмента и уровня документа, поскольку именно на уровне документа выполняется сопоставление материалов коллекции при поиске и тематической группировке [13]. Агрегация векторных представлений фрагментов в агрегированный вектор документа задаёт-

Таблица 2.

Алгоритмические ограничения и условия применимости эмбеддинг-методов автоматического индексирования научных текстов

Ограничение	Содержание проблемы	Практическое следствие	Условие применимости
Равноправие векторов	Сходные векторы для терминов разной значимости	Попадание второстепенных обозначений в ключевые термины	Введение весовых коэффициентов для позиций текста
Контекстная размытость	Смешение тематического фона и смыслового ядра	Снижение точности отбора терминов	Учёт локального и глобального контекста
Утрата структурной значимости	Игнорирование роли заголовков и разделов	Потеря приоритетов терминов документа	Моделирование структуры научного текста
Зависимость от домена	Смещение смыслов при переносе моделей	Нестабильность результатов между коллекциями	Доменная адаптация векторных моделей
Чувствительность к предобработке	Влияние токенизации и нормализации	Различия в списках ключевых терминов	Унификация процедур подготовки данных
Масштабность корпуса	Рост вычислительной сложности	Замедление индексирования больших коллекций	Оптимизация и выбор облегчённых моделей
Полисемия терминов	Смешение разных значений одной формы	Ошибки семантического сопоставления	Применение контекстных представлений
Неполнота множества кандидатов	Пропуск значимых формулировок	Ограничение точности извлечения	Расширенные правила генерации кандидатов
Стабильность результата	Вариативность при смене параметров	Снижение воспроизводимости	Жёсткая фиксация настроек эксперимента
Интерпре-тируемость	Трудность объяснения выбора терминов	Ограничение экспертного контроля	Комбинация векторов и правил отбора
Шум текстовых данных	Наличие нетерминологических элементов	Засорение итогового списка	Фильтрация и тематическая нормализация
Многоязычность коллекций	Несоответствие форм терминов	Потеря сопоставимости документов	Семантическое выравнивание языков

Источник: авторская разработка

ся взвешенной комбинацией с учётом структуры текста, что обеспечивает разделение вкладов заголовка, аннотации и основного текста в итоговом представлении [12]. Формула (2) представлена следующим выражением

$$v(d) = \frac{\sum_{s=1}^{m} \beta_s \times v_s(d)}{\sum_{s=1}^{m} \beta_s} \quad (2)$$

где: вектор $v_s(d)$ соответствует представлению фрагмента документа, индекс s относится к структурному элементу, коэффициент $ß_s$ задаёт вес структурного элемента, m соответствует числу учитываемых элементов структуры научного текста.

На основании рассмотренных вводных целесообразно разработать структурно-семантическую модель автоматического индексирования научного текста на основе использования эмбеддингов (рис. 1).

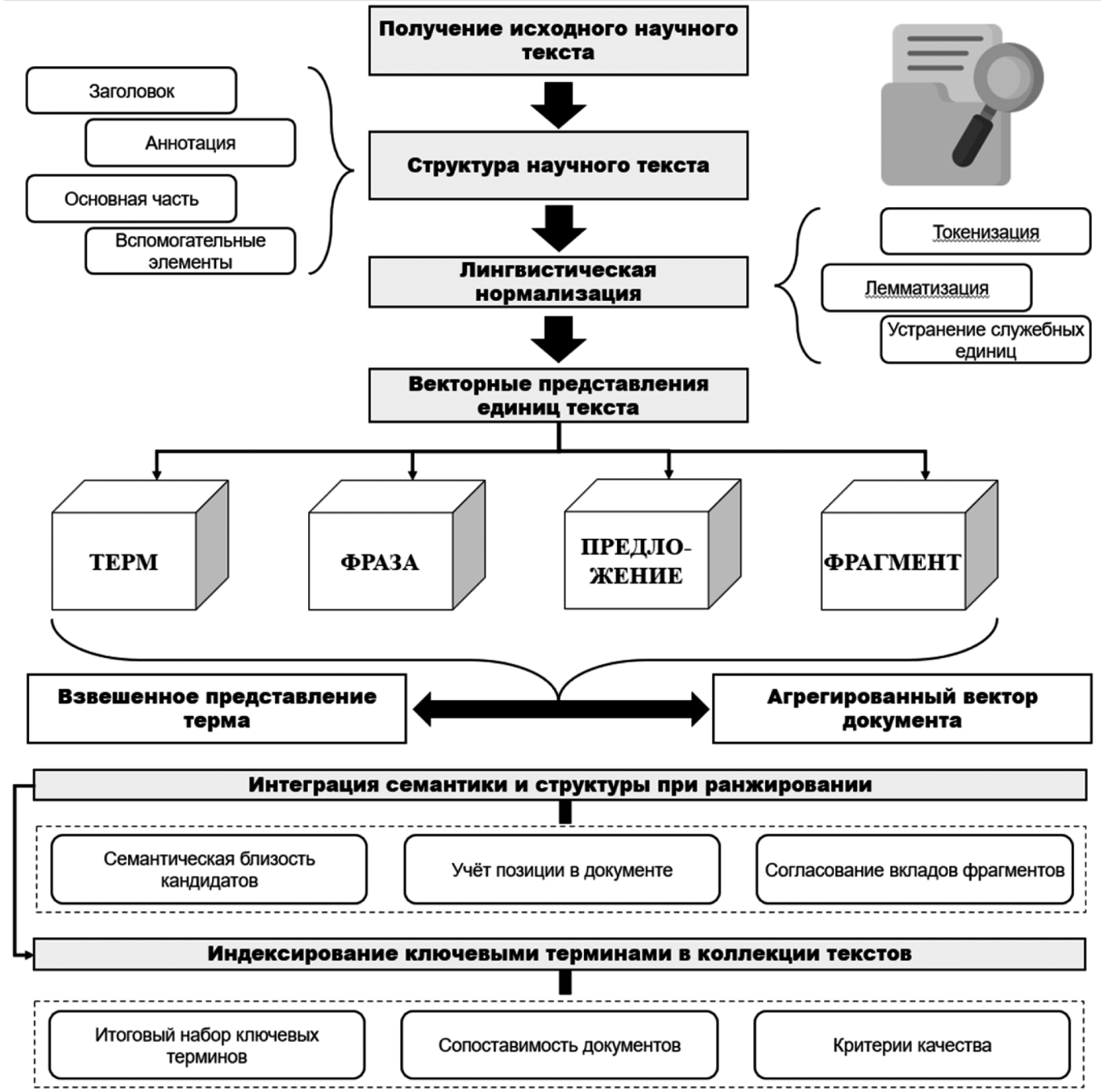


Рис. 1. Структурно-семантическая модель автоматического индексирования научного текста на основе векторных представлений

Источник: авторская разработка

Представленная авторская схема отражает целостную структурно-семантическую модель автоматического индексирования научных текстов на основе эмбеддингов, в которой процесс обработки организован как взаимосвязанная система уровней и блоков. Исходный научный текст рассматривается в неразрывной связи с его внутренней структурой, после чего выполняется лингвистическая нормализация, обеспечивающая единообразие представления единиц текста. Далее формируются векторные представления термов, фраз, предложений и фрагментов, что позволяет перейти от текстовой формы к формализованному описанию содержания. На следующем уровне осуществляется взвешивание представлений термов и построение агрегированного вектора документа с учётом значимости различных структурных элементов публикации. Интеграция семантики и структуры при ранжировании кандидатов обеспечивает согласование близости терминов с их позицией в документе и с вкладом отдельных фрагментов. Финальный этап связан с формированием итогового набора ключевых терминов, поддерживающих сопоставимость документов и применение единых критериев качества в рамках цифровых научных коллекций.

Качество автоматического индексирования научных текстов зависит от того, какие структурные элементы документа включаются в обработку и с какими весами выполняется агрегация векторных представлений. При равном учёте заголовка, аннотации и основной части возрастает вероятность смещения ключевых терминов в сторону наиболее частотных или тематически «общих» формулировок, тогда как для научной публикации принципиальна связь термина с информативными фрагментами, отражающими предметный вклад работы [12]. В процессе раздельной обработки структурных элементов и последующей интеграции оценка релевантности кандидатов опирается на более строгий контекст, поэтому снижается доля терминов, совпадающих по тематике, однако не отражающих содержание конкретного исследования [10].

Наибольшая концентрация смысловых маркеров обычно наблюдается в заголовке и аннотации, однако такая концентрация приводит к появлению «витринных» терминов, ориентированных на описание области, а не на детализацию результата, поэтому приоритет этих элементов оправдан только при контроле структуры и при сопоставлении с основной частью [11]. Секции постановки задачи и обзора нередко воспроизводят общепринятую терминологию предметной области, что повышает риск доминирования терминов высокого уровня и вытеснения более специфичных обозначений, встречающихся в разделах методики и результатов [9].

Проверка воспроизводимости результатов в рамках цифровых научных коллекций опирается на согласованность ключевых терминов при варьировании долей структурных элементов и при смене процедур нормализации, поэтому для сопоставимых экспериментов требуется единый протокол подготовки корпуса и единые правила формирования агрегированного вектора документа [13]. При нарушении сопоставимости входных условий расхождения в пространстве векторных представлений приводят к неустранимым различиям в ранжировании кандидатов, что усложняет оценку качества автоматического индексирования как процедуры системного анализа [12].

Выводы

В исследовании рассмотрено автоматическое индексирование научных текстов ключевыми терминами как задача системного анализа, в которой важны сопоставимость результатов и единые правила обработки цифровых научных коллекций. Разработанная структурно-семантическая модель задаёт единое представление документа, в котором семантическая близость кандидатов согласуется с их позицией в публикации. Практическая ценность предложенных решений связана с возможностью применения чётких критериев проектирования процедур автоматического индексирования, ориентированных на воспроизводимость и интерпретируемость результатов в цифровых научных коллекциях. Для прикладного применения важна стандартизация подготовки текста и правил агрегации, поскольку сопоставимость итоговых наборов ключевых терминов зависит от единообразия входных процедур и выбранных весов структурных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев Д.И., Апанович З.В. Влияние методов построения векторных представлений имен сущностей на качество выравнивания сущностей // Научный сервис в сети Интернет. — 2022. — Т. 24. — С. 155–166.
2. Гусев Д.И., Апанович З.В. Как эмбеддинги имен сущностей влияют на качество выравнивания сущностей // Электронные библиотеки. — 2023. — Т. 26. — № 1. — С. 52–79.
3. Демидова Л.А., Морошкин Н.А. Решение задачи кластеризации векторных представлений регулярных выражений // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2025. — Т. 21. — № 2. — С. 50–59.
4. Комарова Л.А., Колосов А.М., Соловьев В.И. Сопоставление векторных представлений вакансий и резюме с использованием больших языковых моделей // International Journal of Open Information Technologies. — 2025. — Т. 13. — № 2. — С. 56–66.
5. Куровский С.В., Мишин Д.А., Маринин А.К., Бурдик В., Куровская М.А. Современные подходы к автоматизации и оптимизации инвестиционных сервисов телекоммуникационных компаний // Инновации и инвестиции. — 2024. — № 10. — С. 455–460.

6. Куровский С.В., Мишин Д.А., Штыков Р.А. Задачи и методы формализации и оптимального управления цифровыми сервисами в компаниях // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2024. — № 10–2. — С. 39–45.
7. Куровский С.В., Мишин Д.А., Шульман В.Д. Алгоритм балансировки нагрузки в гетерогенной среде вычислительной системы // Международный научно-исследовательский журнал. — 2025. — № 5 (155). — С. 1–10.
8. Лях А.П. Классификация и основные алгоритмы эмбеддинга в контексте больших языковых моделей // Ученые заметки ТОГУ. — 2024. — Т. 15. — № 3. — С. 79–83.
9. Прошина М.В. Современные методы обработки естественного языка: нейронные сети // Экономика строительства. — 2022. — № 5. — С. 27–42.
10. Усатов А.А., Недзьведь А.М., Цзижань Г. Оценка сходства между наборами данных с помощью векторных представлений // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. — 2025. — Т. 23. — № 3. — С. 70–76.
11. Чернышева А.В., Хлопотов М.В. Метод векторного представления и автоматизированной оценки учебного плана в системе интеллектуальной поддержки проектирования образовательных программ // Экономика. Право. Инновации. — 2024. — №. 2. — С. 61–71.
12. Asudani D.S., Nagwani N.K., Singh P. Impact of word embedding models on text analytics in deep learning environment: a review // Artificial intelligence review. — 2023. — Vol. 56. — No. 9. — P. 10345–10425.
13. Egger R. Text representations and word embeddings: Vectorizing textual data // Applied data science in tourism: Interdisciplinary approaches, methodologies, and applications. — Cham: Springer International Publishing, 2022. — P. 335–361.
14. Khan M.Q. et al. Impact analysis of keyword extraction using contextual word embedding // PeerJ Computer Science. — 2022. — Vol. 8. — P. 1–16.
15. Patil R. et al. A survey of text representation and embedding techniques in nlp // IEEe Access. — 2023. — Vol. 11. — P. 36120–36146.
16. Petukhova A., Matos-Carvalho J.P., Fachada N. Text clustering with large language model embeddings // International Journal of Cognitive Computing in Engineering. — 2025. — Vol. 6. — P. 100–108.

© Комаров Иван Дмитриевич (i.komaroni@ya.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.16

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ РАДИАЦИОННОГО ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ С УЧЕТОМ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

METHODS FOR MANAGING RISKS IN THE PROCESSING OF RADIATION SECONDARY RAW MATERIALS WITH CONSIDERATION OF ENVIRONMENTAL CONSTRAINTS

S. Korendyasev
O. Romashkova
A. Kapterev

Summary. The article analyzes approaches to managing the risks associated with the processing of radioactive secondary raw materials at recycling facilities under strict environmental constraints. This study is relevant due to the need to ensure the safety of operations involving radioactive waste while minimizing its negative impact on the environment in accordance with strict regulatory requirements. The paper examines the main groups of risks that arise during the transportation, sorting, processing, and subsequent storage of raw materials.

It also highlights the approaches used to identify, assess, and mitigate these risks, including quantitative methods, system analysis tools, and the implementation of environmentally friendly technologies. A special emphasis is placed on including environmental constraints in the control loop, which involves controlling emissions and complying with international standards and regulations. The paper proposes management methods based on scenario modeling and formalized decision-making algorithms aimed at reducing environmental risks.

The paper provides examples of the practical application of these approaches at a recycling facility and evaluates their effectiveness in terms of environmental safety and sustainability of technological processes. The paper demonstrates that the proposed solutions can reduce environmental impact and improve the safety of radioactive waste processing. The paper's findings can be useful for radiation safety specialists, environmentalists, and engineers responsible for managing and optimizing technological processes.

Keywords: radiation risks, processing of radiation raw materials, environmental constraints, risk management, recycling complex, environmental safety, systems analysis, modeling, regulatory requirements, sustainable development.

Корендясев Станислав Васильевич
Аспирант, ГАОУ ВО Московский городской педагогический университет
KorendyasevSV@mgpu.ru
Ромашкова Оксана Николаевна
Доктор технических наук, профессор, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, г. Москва
ox-rom@yandex.ru
Каптерев Андрей Игоревич
Доктор педагогических наук, доктор социологических наук, профессор, ГАОУ ВО Московский городской педагогический университет
kapterev@yandex.ru

Аннотация. В работе анализируются подходы к управлению рисками, возникающими при переработке радиационного вторичного сырья на рециклинговых комплексах в условиях жёстких экологических ограничений. Исследование актуально ввиду необходимости гарантировать безопасность операций с радиоактивными отходами и одновременно снижать их негативное влияние на окружающую среду при действии строгих нормативных требований. Рассмотрены основные группы рисков, проявляющиеся на стадиях транспортировки, сортировки, переработки и последующего хранения сырья.

Показаны используемые подходы к идентификации, оценке и снижению рисков, среди которых выделяются количественные методы, средства системного анализа и внедрение экологически ориентированных технологий. Отдельный акцент сделан на включении экологических ограничений в контур управления, что предполагает контроль выбросов и соблюдение международных стандартов и регламентов. Предложены методы управления, в основе которых лежат сценарное моделирование и формализованные алгоритмы принятия решений, ориентированные на уменьшение экологических рисков.

Приведены примеры практического применения разработанных подходов на рециклинговом комплексе, а также дана оценка их результативности по показателям экологической безопасности и устойчивости технологических процессов. Показано, что использование предложенных решений позволяет сократить экологическое воздействие и повысить уровень безопасности переработки радиоактивных отходов. Материалы статьи могут быть полезны специалистам в области радиационной безопасности, экологам и инженерам, отвечающим за управление и оптимизацию технологических процессов.

Ключевые слова: радиационные риски, переработка радиационного сырья, экологические ограничения, управление рисками, рециклинговый комплекс, экологическая безопасность, системный анализ, моделирование, нормативные требования, устойчивое развитие.

Введение

Переработка радиационного вторичного сырья относится к числу наиболее технологически сложных и потенциально опасных процессов, поскольку сопряжена с совокупностью радиационных и экологических факторов риска. Рост объёмов радиоактивных отходов, образующихся при эксплуатации и выводе из эксплуатации ядерных объектов, обостряет задачу разработки подходов к их безопасной переработке и долговременному контролю воздействия на окружающую среду.

Современные экологические регламенты, закреплённые в международных рекомендациях МАГАТЭ и национальных стандартах (включая ГОСТ Р), требуют жёсткого ограничения выбросов, предотвращения вторичного загрязнения и постоянного мониторинга радиационной обстановки [1]. Это вынуждает пересматривать традиционные схемы обращения с отходами в пользу более гибких и формализованных систем управления рисками, интегрированных с экологическими ограничениями.

Особая сложность заключается в том, что риск формируется на всех этапах технологической цепочки: от транспортировки и сортировки до переработки и длительного хранения, причём для каждого этапа характерна своя конфигурация угроз и неопределённостей. В таких условиях возрастает значение количественных методов оценки риска, системного анализа и цифрового моделирования, позволяющих прогнозировать последствия возможных событий и оптимизировать режимы работы рециклинговых комплексов.

Цель исследования состоит в разработке методов управления рисками при переработке радиационного вторичного сырья с учётом действующих экологических ограничений и требований устойчивого развития. Для достижения цели решаются задачи анализа ключевых радиационных и экологических рисков, выбора и адаптации методов их идентификации и оценки, построения подходов к управлению, интегрирующих экологические нормативы, а также проверки эффективности предложенных решений на примере рециклингового комплекса.

Анализ рисков и экологических ограничений при переработке радиационного сырья

Обращение с радиационным вторичным сырьём представляет собой многоэтапный процесс, в ходе которого возможны как контролируемые, так и случайные воздействия ионизирующего излучения на персонал, население и элементы экосистем. Каждый этап — транспортировка, сортировка, переработка, хранение — характеризуется специфическими источниками опасности, связанными с физико-химическими свойствами материалов, состоянием оборудования и особенностями инфраструктуры.

При транспортировке основной риск связан с утечкой радиоактивных веществ вследствие нарушения герметичности, аварий на маршруте или некорректного выбора тары и схемы перевозки. Для его снижения используются сертифицированные контейнеры типов B(U) и B(M), системы контроля состояния груза и маршрута, а также оптимизация логистики с учётом характеристик радионуклидов и внешних условий [2].

На этапе сортировки возрастают риски облучения персонала и ошибочной классификации фракций сырья, что впоследствии влияет на безопасность и эффективность переработки. Для уменьшения этих рисков внедряются автоматизированные линии с робототехническими комплексами, гамма-спектрометрическими системами и адаптивными алгоритмами, учитывающими неоднородность составов.

Процессы переработки, включающие механические, химические и термические операции, сопровождаются вероятностью выброса радиоактивных аэрозолей и жидких сбросов, а также образования вторичных отходов с высокой активностью. Снижение риска достигается за счёт применения многоступенчатых систем фильтрации и очистки, жёсткого контроля параметров (температуры, давления, концентраций реагентов) и мониторинга состояния оборудования в режиме реального времени. Экологические нормативы фиксируют целевые уровни безопасности и задают рамки для проектирования и эксплуатации рециклинговых комплексов.

Долговременное хранение переработанных материалов и отходов предполагает наличие надёжных инженерных барьеров, устойчивых к внешним воздействиям, коррозии и старению материалов. Важную роль играют системы непрерывного мониторинга состояния хранилищ, прогнозные модели деградации барьеров и регламентные мероприятия по предупреждению утечек и нарушений целостности конструкций.

Для структурирования результатов анализа рисков и экологических ограничений ниже приведена таблица 1, в которой систематизированы основные критерии для каждого этапа переработки радиационного сырья.

Разработка методов управления рисками с учетом экологических ограничений

Эффективное управление рисками при переработке радиационного вторичного сырья требует интеграции различных подходов, включая использование передовых технологий, системный анализ и учет экологических нормативов. Разработанные методы управления осно-

Таблица 1.

Результаты анализа рисков

Этап переработки	Основные риски	Источник риска	Потенциальные последствия	Меры минимизации
Транспортировка	Утечка радиоактивных веществ	Нарушение герметичности контейнеров, аварии	Локальное загрязнение, угроза экосистемам и здоровью населения	Использование контейнеров типа B(U)/B(M), оптимизация маршрутов, мониторинг в реальном времени
Сортировка	Облучение персонала, ошибки классификации	Недостаточная автоматизация, неоднородность сырья	Повреждение здоровья, сбои в переработке	Автоматизированные системы с гамма-спектрометрами, адаптивные алгоритмы
Переработка	Выбросы радиоактивных частиц	Неисправность оборудования, ошибки в химических процессах	Загрязнение воздуха и воды, вторичные отходы	Технологии фильтрации, контроль параметров в реальном времени
Хранение	Долговременное загрязнение	Утечка радиации, деградация контейнеров	Экологический ущерб, угроза экосистемам	Многослойные барьеры, системы мониторинга, прогнозирование рисков

ваны на принципах системного подхода, который позволяет объединить данные из различных источников, таких как системы мониторинга радиационной обстановки, результаты аналитических расчетов и прогнозы, основанные на математическом моделировании. Эти методы направлены на минимизацию рисков, связанных с радиационным воздействием, и обеспечение соответствия процессов переработки строгим экологическим стандартам.

Классификация методов управления рисками

Эффективное управление рисками при переработке радиационного вторичного сырья требует согласованного использования технологических, организационных и информационных решений в рамках единой системы [3]. В основе разработанных методов лежит системный подход, позволяющий объединить данные мониторинга, результаты расчётов, регламентные требования и прогнозы последствий в общую модель управления.

На рисунке 1 показана классификация методов управления рисками.

Ключевым элементом такой системы является мониторинг в реальном времени, обеспечивающий оперативное выявление отклонений от нормативных параметров и быструю реакцию на потенциально опасные события [4]. Высокоточные датчики радиации, температуры, давления и вибрации интегрируются в автоматизированные комплексы, которые при превышении порогов инициируют защитные действия или перевод оборудования в безопасные режимы.

Значительный потенциал демонстрируют цифровые двойники рециклинговых комплексов, позволяющие в виртуальной среде воспроизводить технологические процессы и оценивать последствия разных сценариев управления [5]. Использование цифрового моделирования облегчает отработку режимов переработки, проверку устойчивости системы к отказам и оптимизацию параметров с точки зрения экологической безопасности и производительности [6].



Рис. 1. Методы управления рисками

Дополнительный эффект достигается за счёт применения методов машинного обучения и искусственного интеллекта, анализирующих большие массивы эксплу-

атационных данных. Алгоритмы кластеризации и прогнозирования выделяют зоны повышенного риска, обнаруживают скрытые закономерности, предшествующие аварийным событиям, и формируют рекомендации по коррекции режимов работы.

Технологии Интернета вещей обеспечивают непрерывный поток данных с многочисленных датчиков, установленных на оборудовании и в контрольных точках по периметру комплекса. Их использование совместно с аналитическими платформами позволяет реализовать предиктивное обслуживание, сокращать вероятность отказов и своевременно выявлять аномалии, влияющие на радиационную и экологическую безопасность.

Особое внимание уделяется экологически ориентированным технологиям: замкнутым циклам переработки, усовершенствованным системам фильтрации и минимизации объёмов отходов, подлежащих захоронению. Включение экологических ограничений (ПДК, требования к выбросам и сбросам) непосредственно в критерии оптимизации позволяет рассматривать безопасность и устойчивость как равноправные целевые показатели наряду с экономической эффективностью.

Практическая апробация разработанных методов на рециклинговом комплексе показала, что совокупное использование мониторинга, цифровых двойников и алгоритмов ИИ позволяет снизить вероятность аварийных выбросов на 15–20 % и сократить экологическое воздействие на 18–22 % по сравнению с традиционными подходами [7]. Одновременно уменьшилось время реагирования на инциденты с минут до нескольких секунд, а экономический эффект проявился в снижении затрат на ликвидацию последствий аварий и обращение с отходами.

Процесс использования методов управления рисками можно описать схемой на рисунке 2.

Оценка эффективности методов управления рисками

Для количественной оценки эффективности разработанных методов использовались ключевые показатели: вероятность возникновения аварийных ситуаций, уровень воздействия на окружающую среду, скорость реагирования на события и объём отходов, направляемых на захоронение. Анализ проводился на основе данных, полученных в условиях, близких к эксплуатации реального комплекса, с учётом действующих нормативных ограничений.

Сравнение с применявшимися ранее схемами управления показало, что автоматизация мониторинга и использования предиктивных моделей существенно повышает оперативность и надёжность реакции системы. Время обнаружения и обработки отклонений технологических параметров сократилось с 5–10 минут до порядка 10–15 секунд, что критично для предотвращения развития аварийных сценариев.

Оптимизация маршрутов транспортировки и режимов эксплуатации оборудования на основе прогностических расчётов позволила одновременно уменьшить риск транспортных происшествий и снизить соответствующие затраты. За счёт внедрения замкнутых технологических циклов и улучшенных схем переработки объём отходов, подлежащих долговременному захоронению, был уменьшен примерно на 15 %.



Рис. 2. Схема процесса управления рисками

Сопоставление полученных результатов с опытом зарубежных объектов переработки, таких как французский комплекс La Hague и японский комплекс Rokkasho, подтверждает сопоставимый уровень экологической эффективности и потенциал для дальнейшего развития предложенных решений [8]. На этих объектах также широко применяются цифровые модели и системы искусственного интеллекта (ИИ), что приводит к сокращению выбросов и улучшению показателей экологической безопасности на 10–15 % и более.

Экологическая результативность методов проявляется в снижении выбросов радиоактивных веществ и уменьшении вероятности хронического загрязнения окружающей среды благодаря совершенствованию систем фильтрации и управлению режимами работы в соответствии с прогнозными моделями. При этом автоматизация и формализация процессов управления рисками облегчают подготовку отчётности, необходимой для прохождения сертификаций и аудитов по международным и национальным стандартам, в том числе рекомендациям МАГАТЭ и ГОСТ Р 51901.10–2020 [9, 10].

Заключение

Проведённое исследование демонстрирует, что объединение системного анализа, цифровых технологий и жёсткого учёта экологических ограничений позволяет существенно повысить уровень безопасности переработки радиационного вторичного сырья. Разработанные методы управления, включающие мониторинг в реальном времени, моделирование сценариев с использованием цифровых двойников и применение алгоритмов машинного обучения, показали высокую результативность в снижении радиационных и экологических рисков на рециклинговых комплексах.

Практическая ценность работы заключается в возможности применения предложенных подходов при проектировании и модернизации комплексов переработки, а также в системах оперативного управления и планирования. Полученные результаты подтверждают, что внедрение автоматизированных систем управления рисками способствует уменьшению вероятности аварий, снижению нагрузок на окружающую среду и повышению безопасности персонала, при одновременном сокращении эксплуатационных и аварийных затрат.

В то же время широкое использование цифровых технологий и ИИ порождает новые требования к подготовке персонала и обеспечению кибербезопасности, поскольку интегрированные системы мониторинга и управления становятся потенциальной целью для внешних воздействий. Необходима разработка программ обучения, ориентированных на работу с цифровыми моделями и интеллектуальными системами, а также формирование надёжной инфраструктуры защиты данных.

Перспективы дальнейших исследований связаны с адаптацией предложенных методов к переработке новых типов радиационного сырья, расширением использования больших данных и созданием распределённых систем мониторинга, объединяющих несколько объектов. Важным направлением является также развитие нормативно-методической базы, регламентирующей применение ИИ и цифровых двойников в управлении рисками и обеспечении экологической безопасности, что позволит повысить прозрачность решений и уровень доверия со стороны общества и надзорных органов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ). Управление безопасностью при обращении с радиоактивными отходами: рекомендации. — Вена: МАГАТЭ, 2020. — 96 с.
2. Гайдук П.В. Оценка и минимизация экологических рисков при переработке радиоактивных материалов / П.В. Гайдук, О.Н. Рябова // Экологическая наука. — 2019. — № 4. — С. 28–33.
3. Каптерев А.И. Технология управления рисками при организации переработки радиационного вторичного сырья на рециклинговом комплексе в условиях сохранения окружающей среды // В сборнике: Открытая наука 2024. Сборник статей III Всероссийской научной конференции с международным участием. Москва, 2024. С. 141–144.
4. Петрова А.М., Ромашкова О.Н., Ермакова Т.Н., Чискидов С.В. Модели процессов функционирования информационной системы мониторинга климата и окружающей среды в арктическом регионе // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 4–2. С. 104–110.
5. Калиева А.Ж., Ромашкова О.Н. Автоматизированная информационная система «Цифровой рудник» на предприятиях атомной промышленности в Республике Казахстан // В книге: Современные проблемы физики и технологий. Сборник тезисов докладов XI международной молодежной научной школы-конференции. Москва, 2024. С. 301–303.
6. Смирнов А.В. Моделирование экологических рисков в ядерной промышленности // Технические науки. — 2021. — № 2. — С. 19–25.
7. 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.
8. Павлов А.И. Современные методы переработки радиоактивных отходов // Экология и безопасность. — 2021. — № 5. — С. 37–42.
9. МАГАТЭ. Экологические аспекты переработки радиоактивных отходов. — Вена: МАГАТЭ, 2018. — 120 с.
10. ГОСТ Р 51901.10–2020. Управление рисками. Анализ риска и оценка безопасности. Общие положения. — М.: Стандартинформ, 2020. — 48 с.

© Корендясев Станислав Васильевич (KorendyasevSV@mgpu.ru); Ромашкова Оксана Николаевна (ox-rom@yandex.ru);
Каптерев Андрей Игоревич (kapterev@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.17

УЯЗВИМОСТИ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА В АДВОКАТСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ: ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЮРИДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

VULNERABILITIES OF ELECTRONIC DOCUMENT MANAGEMENT PROCESSES IN ADVOCACY: TECHNICAL AND LEGAL ASPECTS

I. Korotkiy

Summary. The article examines the technical and legal aspects of ensuring the security of electronic document management systems in the activities of lawyers. As a result of analysing statistical data and technical decomposition of architectural solutions, the authors have identified a gap between regulatory requirements and the actual security of digital channels used by lawyers. Using the examples of the Kontur and Goskey platforms, critical vulnerabilities in electronic document management systems in the context of protecting attorney-client privilege have been identified. Particular attention is paid to the risks of data compromise at intermediate nodes of cloud services and the problem of unprotected execution environments on mobile devices.

Keywords: electronic document management, risk, data, leak, lawyer.

Короткий Игорь Игоревич
Аспирант, ФГАОУ ВО Российский государственный гуманитарный университет, г. Москва
i.korotkiy@bk.ru

Аннотация. В статье проанализированы технические и юридические аспекты обеспечения безопасности систем электронного документооборота в деятельности адвокатов. В результате анализа статистических данных и технической декомпозиции архитектурных решений выявлен разрыв между нормативными требованиями и фактической защищенностью цифровых каналов адвокатуры. На примере платформ «Контур» и «Госключ» обозначены критические уязвимости систем электронного документооборота в контексте защиты адвокатской тайны. Особое внимание уделено рискам компрометации данных на промежуточных узлах облачных сервисов и проблеме незащищенности среды исполнения на мобильных устройствах.

Ключевые слова: электронный документооборот, риск, данные, адвокат.

Для современной адвокатской практики в быстро меняющемся мире права эффективность является ключевой детерминантой. Это предопределяет тот факт, что юридические фирмы постоянно ищут способы оптимизации своей деятельности, и программное обеспечение для электронного документооборота (ЭДО) предлагает современное решение этой задачи [1]. Данная технология позволяет адвокатам выполнять свои обязанности в режиме онлайн. Кроме того, она в некоторых случаях устраняет необходимость в личных встречах с доверителями.

В целом можно отметить, что облачная система управления документами с интегрированной технологией электронной подписи — важный инструмент контроля за затратами и повышения качества и скорости оказываемой юридической помощи, которые становится конкурентным факторами в современной отрасли юридических услуг [2]. Многие адвокатские образования уже получили практическую отдачу от использования систем ЭДО, которая проявляется в обеспечении бесшовного взаимодействия, оптимизации юридических процессов и внедрении усиленных механизмов безопасности, направленных на минимизацию рисков, включая снижение рисков утечки информации, связанной с бумажными документами. Кроме того, современные платформы способствуют ускоренному получению подписей клиентов, а также обеспечивают возможность использования цифровых аудиторских следов в целях повышения прозрачности и подтверждения соответствия установленным нормативным требованиям [3, 4].

Однако внедрение систем ЭДО в адвокатскую практику, наряду с ростом операционной эффективности, создает новые векторы угроз, такие как риски атак на цепочки поставок и превышение полномочий поставщиком услуг [5]. На рис. 1 отображены количественные показатели рисков информационной безопасности (ИБ), которые демонстрируют уязвимость адвокатской деятельности перед современными векторами атак на системы ЭДО.

Статистические данные, представленные на рис. 1, отражают критический рост инцидентов, где объектом посягательства является адвокатская тайна, передаваемая через незащищенные каналы связи или скомпрометированные платформы ЭДО. Отдельно следует отметить устойчивую тенденцию к эскалации киберугроз, при этом темпы роста инцидентов в РФ демонстрируют опережающую динамику относительно среднемировых

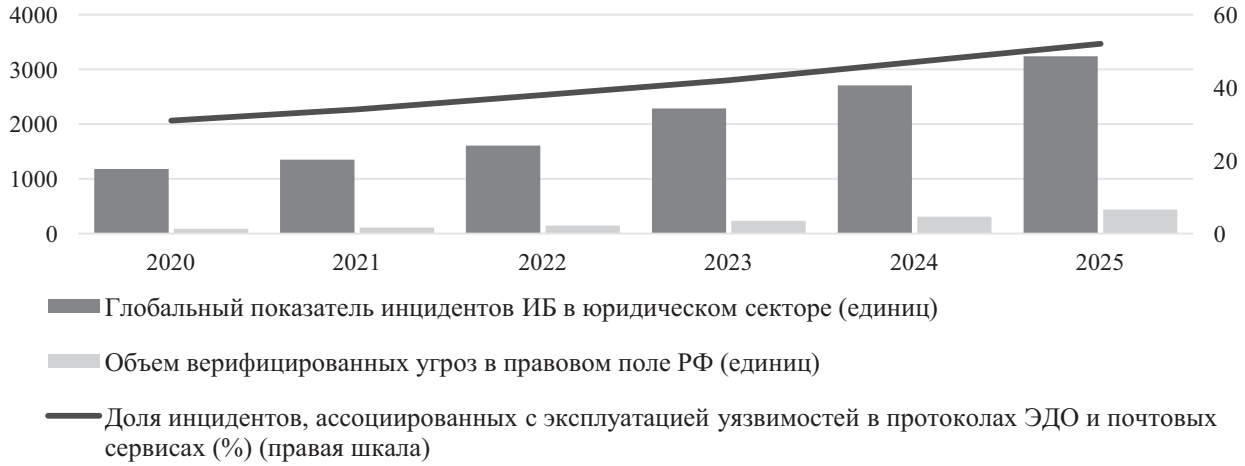


Рис. 1. Динамический анализ количественных показателей киберрисков в инфраструктуре ЭДО адвокатских организаций

Составлено автором на основе агрегированных данных отчетов IBM «Cost of a Data Breach Report» (2020–2024), аналитических обзоров Positive Technologies «Киберугрозы в РФ» и статистики Solicitors Regulation Authority.

показателей. Кроме того, необходимо обратить внимание на прогрессирующее увеличение коэффициента влияния уязвимостей систем электронного документооборота, который в 2025 году превысил критический порог в 50 %, что фактически определяет ЭДО как доминирующий вектор атаки на адвокатскую тайну.

Таким образом, защита систем ЭДО и их безопасное использование в адвокатской деятельности является комплексной задачей, охватывающей правовые, технические, организационные, инфраструктурные, институциональные, профессиональные аспекты, детальное раскрытие которых составляет актуальное направление научного поиска.

Технические аспекты трансформации управления юридическими документами посредством автоматизации и использования цифровых систем, рассматривают в своих публикациях Морозова М.Ю., Фомина П.С., Челак С.В., Филимонова В.А., Junhua Wu, Tiantian Wang, Guangshun Li, Kan Yu.

Проблемы защиты электронной подписи адвоката, а также риски и уязвимости ЭДО, использующих облачные сервисы, описывают Какорина О.А., Юрцев А.Н., Ткачева М.В., Уточкина Л.А., Michael D. Anestis, Allison E. Bond, Malik Mustafa, Marwan Alshare, Deepshikha Bhargava.

Требования к сертификации систем ЭДО в России, практические аспекты соблюдения регламентов хранения и передачи электронных документов адвокатскими образованиями, а также вопросы соответствия систем киберзащиты отраслевым и государственным нормативным актам, нашли свое отражение в работах Даниленко А.Ю., Акимовой Г.П., Черкасовой Е.Н., Сибикиной И.В., Лазаревой Н.А., Цветковой К.В., Эргашевой Р.С.

Несмотря на широкое внимание со стороны научно-экспертных кругов к рассматриваемой проблематике, ряд вопросов нуждается в более углубленном изучении. Так, например, требует дальнейшей проработки проблема соотнесения технических механизмов кибербезопасности с процессуальными гарантиями конфиденциальности и допустимости доказательств. Кроме того, нерешенной остается задача выработки единых стандартов ответственности и реагирования на инциденты информационной безопасности в условиях цифровой трансформации юридической практики.

Таким образом, цель статьи заключается в изучении через призму технических и юридических аспектов уязвимости процессов электронного документооборота в адвокатской деятельности.

Детальное изучение отечественной нормативно-правовой базы (см. табл. 1) позволяет констатировать доминирование организационных мер над жесткими технологическими стандартами в сфере обеспечения информационной безопасности адвокатской деятельности. Отсутствие детальных технических регламентов создает условия для возникновения критических уязвимостей в процессах ЭДО [6]. Данные, представленные в таблице 1, позволяют верифицировать разрыв между требованиями законодательства и фактической защищенностью цифровых каналов коммуникации в деятельности адвокатов.

Сведения, приведенные в таблице 1, позволяют заключить, что в работе адвокатов в России уровень киберрисков и уязвимостей в значительной степени зависит от субъективных решений руководителей адвокатских образований или личных наработок адвокатов, а не от требований стандартов, установленных Феде-

Таблица 1.

Риски нормативной неопределенности в архитектуре цифрового документооборота адвоката

Стадия процесса ЭДО	Нормативное обоснование (акты РФ)	Техническое содержание уязвимости	Риск в области информационной безопасности
Формирование и подготовка документов	Кодекс профессиональной этики адвоката; Федеральный закон № 149-ФЗ	Отсутствие стандартов обязательной очистки метаданных (скрытых атрибутов файла)	Несанкционированное раскрытие истории изменений, структуры локальных каталогов и данных об авторе документа
Транспортировка данных по сетям связи	Федеральный закон № 63-ФЗ «Об электронной подписи»	Отсутствие норм об обязательном применении сквозного шифрования (шифрование от отправителя до получателя)	Перехват и дешифрация информации на промежуточных узлах сетевого оборудования провайдеров связи
Долговременное архивное хранение	ГОСТ Р 7.0.8 (Правила делопроизводства и архивации)	Отсутствие регламентов по обеспечению долговременной достоверности электронного документа	Утрата возможности подтверждения подлинности документа после завершения срока действия сертификата ключа подписи
Управление правами доступа	Приказы ФСТЭК (носящие рекомендательный характер для адвокатов)	Отсутствие требований к реализации архитектуры «нулевого доверия» (непрерывная проверка прав доступа)	Несанкционированный доступ технического персонала или администраторов к адвокатским досье без фиксации в журнале событий
Гарантированное уничтожение	Стандарты профессиональной деятельности (общие положения)	Отсутствие сертифицированных методик безвозвратного удаления данных с физических носителей и из облачных сред	Возможность восстановления конфиденциальных сведений из временных файлов, системных записей и резервных копий

Составлено автором

ральной палатой адвокатов РФ. Выявленные проблемные моменты, начиная от избыточных данных в структуре файлов и заканчивая рисками восстановления удаленной информации, указывают на необходимость доработки рекомендаций ФПА РФ и разработки технического регламента. Внедрение таких механизмов, как аппаратная изоляция ключей шифрования и многофакторная верификация пользователей, позволит минимизировать влияние человеческого фактора и обеспечит защиту адвокатской тайны на всех этапах электронного документооборота [7].

Далее рассмотрим более подробно техническую сторону вопроса уязвимости процессов электронного документооборота в адвокатской деятельности.

В современной отечественной практике наиболее востребованными инструментами цифрового взаимодействия выступают системы «Контур» и «Госключ». Детальный технический анализ данных платформ позволит выявить фундаментальные векторы реализации технологических угроз и сопоставить системные уязвимости процессов информационного обмена с потенциальными рисками для сохранности адвокатской тайны. Составленная автором матрица рисков для систем ЭДО, при использовании анализируемых платформ, представлена в таблице 2.

Проведенное исследование показывает, что эксплуатация систем ЭДО в практике российской адвокатуры сопряжена с рисками, масштаб которых определяется архитектурными особенностями используемых платформ и спецификой отечественного правового регулирования. Техническая верификация процессов в системах «Контур» и «Госключ» позволяет выделить следующие ключевые риски.

1. Проблема делегированного доверия: при использовании централизованных систем (например, «Контур») адвокат фактически делегирует функции контроля над конфиденциальностью оператору ЭДО. Отсутствие возможности проведения независимого аудита и тестов на проникновение со стороны пользователя создает ситуацию «латентной уязвимости», где безопасность адвокатской тайны зависит от добросовестности и киберустойчивости третьей стороны.
2. Уязвимость среды функционирования: в случае с системой «Госключ» основным вектором атаки становится не сам алгоритм электронной подписи, а среда его реализации — мобильное устройство. При отсутствии аппаратной изоляции криптографических ключей (использование доверенных платформ типа TPM/HSM) риск несанкционированной экстракции данных вредоносным программным обеспечением остается критически высоким.
3. Инфраструктурная зависимость: анализ каналов связи и механизмов дистрибуции обновлений подтверждает, что даже легитимное программное обеспечение может стать инструментом компрометации (атаки на цепочки поставок). Без внедрения протоколов с совершенной прямой секретностью и систем многофакторной верифика-

Таблица 2.

Декомпозиция технологических рисков при эксплуатации систем «Контур» и «Госключ» в адвокатской практике

Объект и среда функционирования	Технический вектор реализации риска	Системная уязвимость процесса ЭДО	Последствие для адвокатской тайны
Облачные платформы («Контур»)	Компрометация промежуточного узла: несанкционированный доступ к серверной части оператора.	Отсутствие сквозного шифрования (E2EE) на уровне бизнес-логики поставщика услуг.	Полная эксфильтрация содержимого юридических досье администраторами или внешними злоумышленниками.
	Межсайтовый скриптинг и инъекции: внедрение вредоносного кода в веб-интерфейс системы.	Недостаточная верификация исполняемого кода в клиентском браузере адвоката.	Кража активных сессий и идентификационных данных без нарушения целостности ключей электронной подписи.
Мобильная криптография («Госключ»)	Декомпозиция доверенной среды: эксплуатация уязвимостей операционной системы смартфона.	Хранение секретных ключей в программной среде общего назначения без аппаратной изоляции.	Возможность экстракции закрытого ключа вредоносным программным обеспечением.
	Имитация биометрических признаков: применение нейросетевых моделей для обхода идентификации.	Синтетическая когнитивная атака на механизмы подтверждения личности в мобильном приложении.	Формирование юридически значимой подписи от имени адвоката неуполномоченным лицом.
Каналы передачи данных	Принудительное понижение версии протокола: атака на транспортный уровень соединения.	Использование устаревших стандартов связи (TLS ниже 1.3), допускающих перехват трафика.	Прослушивание канала связи и накопление зашифрованных данных для последующего подбора ключа.
Инфраструктура обновления	Атака на цепочку поставок: внедрение деструктивного кода через легитимные обновления ПО.	Отсутствие независимого аудита и тестов на проникновение перед выпуском патчей операторами.	Скрытое внедрение функций удаленного управления в специализированное ПО адвоката.

Составлено автором

ции, цифровая коммуникация адвоката не может считаться полностью защищенной от перехвата на промежуточных узлах сетевой инфраструктуры.

Вышеизложенное позволяет отметить, что риски, возникающие при эксплуатации адвокатами платформ «Контур» и «Госключ», обусловлены фундаментальным противоречием между централизованной архитектурой сервисов и необходимостью исключения несанкционированного доступа к содержанию адвокатского делопроизводства со стороны операторов и регуляторов. Для обеспечения защищенности систем ЭДО адвокатских образований, а также устранения уязвимостей рассматриваемых систем представляется целесообразным сформулировать рекомендации, которые нацелены на формирование доверенной технической среды, позволяющей нивелировать системные уязвимости за счет внедрения методов аппаратной изоляции и сквозного криптографического сопровождения данных.

Во-первых, модернизация архитектуры взаимодействия с платформой «Контур». Для нивелирования рисков, связанных с компрометацией промежуточных узлов и отсутствием сквозного шифрования в системе «Контур», необходимо предпринять следующие шаги:

— реализация протокола предварительного шифрования, что предполагает обязательное применение программных средств криптографической защиты информации на стороне адвоката для шифрования вложений до их загрузки в облачную инфраструктуру оператора. Данная мера позволит обеспечить функциональную изоляцию облачной инфраструктуры «Контур» от семантического содержания документов [8]. Таким образом роль платформы будет заключаться исключительно в трансляции зашифрованных пакетов данных и управлении метаданными процесса обмена без возможностидешифрацииконтентатретьимилицами;
— изоляция среды веб-доступа путем использования выделенных виртуальных контейнеров или специализированных браузеров с жестко ограниченным набором исполняемых скриптов для работы с веб-интерфейсом системы, что исключает возможность реализации атак типа «межсайтовый скриптинг».

Во-вторых, повышение устойчивости среды функционирования системы «Госключ». Принимая во внимание высокий риск экстракции закрытых ключей из программной среды смартфонов, следует осуществить следующие меры:

— переход на аппаратную токенизацию с помощью внедрения обязательного требования по хранению ключей электронной подписи на внешних аппаратных носителях (смарт-карты, токены с поддержкой NFC), совместимых с мобильным

приложением «Госключ». Это даст возможность исключить нахождение секретного ключа в оперативной памяти мобильного устройства общего назначения;
— программная блокировка работы приложения «Госключ» на устройствах с нарушенной целостностью ядра и отсутствием активированного доверенного модуля, что минимизирует вероятность успеха вредоносного программного обеспечения.

В-третьих, внедрение усиленного механизма верификации субъектности и методов защиты от нейросетевых подмен. Для предотвращения формирования подписи от имени адвоката неуполномоченными лицами через механизмы «Госключа» необходима:
— мультимодальная биометрическая идентификация, а именно дополнение статической биометрии алгоритмами динамической проверки, требующими от пользователя выполнения случайной последовательности действий в реальном времени, что делает невозможным использование синтетических видеопотоков [9];
— внедрение криптографической привязки биометрического шаблона к уникальному идентификатору доверенного аппаратного модуля конкретного устройства.

Подводя итоги проведенному исследованию, можно сделать следующие выводы. Текущая инфраструктура ЭДО в российской адвокатской практике характеризуется высокой степенью уязвимости перед современными векторами кибератак, что обусловлено доминированием организационных мер над технологическими стандартами. Установлено, что централизованная архитектура платформы «Контур» и программная реализация мобильной криптографии «Госключ» создают риски несанкционированной эксфильтрации данных администраторами систем или вредоносным программным обеспечением. Фундаментальным решением обозначенных проблем является переход к парадигме технологически гарантированной конфиденциальности, исключающей зависимость адвокатской тайны от добросовестности третьих лиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жучков С.В. Цифровая трансформация совершения нотариальных действий в России // Вестник РГГУ. Серия: Экономика. Управление. Право. 2022. № 3–2. С. 253–261.
2. Чертков Н.Н. Квалифицированная электронная подпись как ключевой атрибут электронного юридического документа: проблемы правоприменения // Юридическая наука. 2025. № 11. С. 293–298.
3. Jiaqi Ju, Qi Wang, Wei Wang, Ming Ni Resilience enhancement strategy for cyber–physical distribution systems that considers cross-space propagation of information risk // IET Renewable Power Generation. 2023. Volume 18, Issue 7. P. 12–19.
4. Рытова Е.И. Кибербезопасность государственных информационных систем. Актуальные вопросы безопасности ИС в судебной системе // Оригинальные исследования. 2025. Т. 15. № 8. С. 83–88.
5. Gauri Shankar, Liwa H. Ai-Farhani Improved Multisignature Scheme for Authenticity of Digital Document in Digital Forensics Using Edward-Curve Digital Signature Algorithm // Security and Communication Networks. 2023. Volume 20, Issue 1. P. 13–17.
6. Мезенцев А.В. Анализ уязвимостей электронных подписей на мобильных платформах с использованием VOSVIEWER // Славянский форум. 2025. № 4 (50). С. 45–69.
7. Bagus Tri Atmaja, Jiann-Liang Chen Integrating Large Language Model for Common Criteria Security Document Generation Based on PySide6 // Software: Practice and Experience. 2025. Volume 55, Issue 10. P. 29–34.
8. Романенко К.С. Обзор проблем безопасности систем электронного документооборота // Информатизация и связь. 2023. № 2. С. 76–79.
9. Дудник И.А., Ульянова Е.В. Современные инструменты обеспечения безопасности систем электронного документооборота // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 97–12. С. 67–70.

© Короткий Игорь Игоревич (i.korotkiy@bk.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.18

БЕЗОПАСНОСТЬ ЦИФРОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ АДВОКАТА: ПРАВОВЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫБОРА НАДЕЖНЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ

LAWYER'S DIGITAL COMMUNICATIONS SECURITY: LEGAL AND TECHNICAL ASPECTS OF CHOOSING RELIABLE COMMUNICATION CHANNELS

I. Korotkiy

Summary. The article focuses on current issues related to the protection of confidential data by lawyers when using digital communications. The study pays particular attention to key global trends in information security in the activities of attorneys in different countries around the world. A comparative analysis of the regulatory framework and standards for ensuring cyber security of legal services is also conducted, using Russia, the United States, the United Kingdom, and the European Union as examples. Based on the analysis, technical criteria for selecting and verifying secure digital communication channels in legal practice are systematised.

Keywords: lawyer, digital communications, protection, confidentiality, data.

Короткий Игорь Игоревич
Аспирант, ФГАОУ ВО Российский государственный гуманитарный университет, г. Москва
i.korotkiy@bk.ru

Аннотация. Статья посвящена актуальным вопросам, связанным с защитой адвокатами конфиденциальных данных при использовании цифровых коммуникаций. Отдельное внимание в процессе исследования уделено ключевым глобальным трендам информационной безопасности в деятельности адвокатов в разных странах мира. Также проведен сравнительный анализ нормативно-правовой базы и стандартов обеспечения киберзащиты в адвокатской практике на примере России, США, Великобритании и Европейского Союза. На основании проведенного анализа систематизированы технические критерии выбора и верификации защищенных каналов цифровой коммуникации в адвокатской деятельности.

Ключевые слова: адвокат, цифровые коммуникации, защита, конфиденциальность, данные.

Адвокаты выступают ключевыми институтами доверия и правовой добросовестности в сфере оказания квалифицированной юридической помощи и защиты законных интересов доверителей. Их профессиональная деятельность включает проведение комплексной юридической проверки (due diligence), в том числе идентификацию доверителей и их полномочий, оценку правомерности планируемых действий, а также минимизацию правовых рисков и подтверждение юридической чистоты сопровождаемых процедур [1]. Одной из фундаментальных обязанностей адвоката является формирование и соблюдение эффективной политики защиты конфиденциальной информации и персональных данных клиентов, включая предотвращение несанкционированного доступа, утечек и неправомерного использования сведений.

В данном контексте необходимо отметить, что профессия адвоката, ее процессы и практика претерпели стремительные изменения с ростом глобализации и новыми требованиями к доступности юридической помощи в цифровом формате, что также привело к появлению новых правил, защищающих эти фундаментальные юридические процессы от киберрисков. В условиях цифровизации адвокатской деятельности и расширения электронных сервисов вопросы конфиденциальности, информационной безопасности и защиты сведений, отнесенных к охраняемым законом видом тайн, приобретают особую актуальность, поскольку адвокаты все чаще взаимодействуют с электронными реестрами, цифровыми документами и удалёнными каналами коммуникации, что требует внедрения дополнительных организационных и технологических мер защиты информации [2].

Наглядно о сложившейся ситуации свидетельствуют количественные показатели, характеризующие состояние информационной безопасности цифровых каналов связи в нотариальной и юридической деятельности (см. табл. 1). Данные, представленные в таблице 1, отражают корреляцию между развитием технологических векторов атак и эффективностью существующих систем защиты информации в различных странах за период 2024–2025 годов.

Итак, принимая во внимание сведения, представленные в таблице 1, очевидна потребность в разработке практических рекомендаций, контрольных списков, а также общеправовых обязанностей для адвокатов принимать компетентные и разумные меры, связанные с защитой информации, усовершенствованием систем

Таблица 1.

Глобальные технологические тренды информационной безопасности цифровых каналов связи в адвокатской деятельности (2024–2025 гг.).

Параметр анализа	РФ	США	ЕС	Глобальный технологический тренд
Интенсивность кибератак (единиц инцидентов)	118–135	> 31 000	> 4 800	Автоматизация эксплуатации уязвимостей: масштабное сканирование и реализация деструктивного воздействия на сетевые шлюзы.
Объем утечек (миллионов уникальных записей)	710	142,9	110	Интеллектуальная агрегация данных: формирование комплексных векторов угроз путем синтеза данных из гетерогенных источников.
Отраслевая концентрация (процент от общего числа атак)	12 %	14 %	11 %	Эксплуатация доверенного доступа: компрометация привилегированного узла для несанкционированного входа в государственные реестры.
Экономический ущерб (миллионов долларов США)	0,06	10,22	4,4	Рост издержек на репозицию системы: ресурсные затраты на криптографическую регенерацию и аудит информационной инфраструктуры.
Доля применения генеративного ИИ (процент от векторов атаки)	12,50 %	16,00 %	14,50 %	Синтетическая когнитивная атака: применение нейросетевых моделей для имитации биометрических и текстовых признаков идентификации.
Длительность скрытого присутствия (суток)	185	292	215	Латентная эксфильтрация данных: сохранение несанкционированного доступа к трафику каналов связи без прерывания штатных бизнес-процессов.
Уязвимость цепочек поставок (процент успешных проникновений)	24 %	30 %	22 %	Декомпозиция доверенной среды: внедрение вредоносного кода через легитимные механизмы обновления специализированного программного обеспечения.

Составлено автором по данным отчетов «Cost of a Data Breach Report» (IBM Security), «Data Breach Investigations Report» (Verizon), «ENISA Threat Landscape» (Агентство Европейского Союза по кибербезопасности) и аналитических обзоров ПАО «Сбербанк» и ГК «InfoWatch» (2024–2025 гг.)

кибербезопасности и поддержкой эффективных политик, направленных на снижение потенциальных рисков утечки данных.

Таким образом, актуальность и практическая значимость рассматриваемых вопросов предопределили выбор темы данной статьи.

Детальный анализ угроз для данных в компьютерах, мобильных устройствах и информационных системах, используемых адвокатами, описывают в своих трудах Бегичев А.В., Рисовская С.С., Захаркина А.В., Новоселова М.Д., M. Robles-Carrillo, P. García-Teodoro, Özgür Arikan.

Нормативно-правовые аспекты и проблемы, связанные с внедрением цифровых средств в адвокатскую деятельность, а также методы защиты цифровых коммуникаций адвоката рассматривают Фадеев А.В., Воронина П.А., Советкина А.С., Лошкарёв А.В., Коган М.И., Магдеева Д.И.

Технические аспекты использования в цифровых коммуникациях адвокатов стандартизированных сертификатов ИТ-безопасности, таких как ISO 27001, программа Cloud Security Alliance STAR или EuroCloud изучают

Yong Ding, Weiguo Huang, Hai Liang, John Zeleznikow, Hugo Mentzingen, Nuno António, Li Ge, Peng Yan Li.

Высоко оценивая имеющиеся на сегодняшний день труды и наработки, необходимо отметить, что еще широкий спектр вопросов защиты цифровых коммуникаций в адвокатском деле остается нерешенным. Так, например, отдельного внимания заслуживают задачи комплексной оценки устойчивости цифровых каналов к целенаправленным атакам, а также практической интеграции криптографических механизмов с требованиями соблюдения адвокатской тайны и процессуального законодательства. Дополнительную сложность представляет отсутствие единых методик выбора и верификации коммуникационных решений с учётом одновременно технических рисков, правовой ответственности и человеческого фактора.

Таким образом, цель статьи заключается в проведении анализа правовых и технических аспектов выбора надежных каналов связи для обеспечения безопасности цифровых коммуникаций адвоката.

Прежде всего, отметим, что цифровые коммуникации адвоката — это совокупность защищенных высокотехнологичных протоколов, программно-аппаратных средств и инфраструктурных решений, обеспечивающих обмен юридически значимой информацией между адвокатом и субъектами правоотношений (доверителями, судами, государственными органами) [3, 4].

Архитектурные компоненты цифровых коммуникаций включают в себя:

- среды передачи данных: каналы связи, защищенные с помощью криптографических протоколов (TLS/SSL, VPN-туннелирование, ГОСТ-шифрование);
- системы юридически значимого документооборота: платформы для обмена файлами, поддерживающие использование усиленной квалифицированной электронной подписи;
- интерфейсы взаимодействия с государственными ГИС: интеграция с сервисами типа «Электронное правосудие» (ГАС «Правосудие»), «Мой арбитр» и системами Федеральной палаты адвокатов (ККИС ФПА);
- виртуальные переговорные среды: системы видео-конференц-связи, развернутые внутри защищенного контура, исключающие утечку данных на сторонние серверы [5].

Соответственно, учитывая сложность и комплексность цифровых коммуникаций адвоката, а также их критическую значимость для защиты адвокатской тайны и иных охраняемых законом видов тайн, например, персональных данных доверителя, данных предварительного расследования, обеспечение информационной безопасности в деятельности адвокатуры представляет собой сложную междисциплинарную задачу. С точки зрения информационных технологий, адвокатская деятельность характеризуется высокой степенью конфиденциальности обрабатываемых данных и необходимостью обеспечения целостности и доступности юридически значимой информации.

Кратко рассмотрим правовые основы, регламентирующие данные вопросы в разных странах мира.

Российская Федерация. Правовой фундамент данной предметной сферы основан на Федеральном законе «Об адвокатской деятельности и адвокатуре в Российской Федерации», Кодексе профессиональной этики адвоката и Федеральном законе «О персональных данных».

Также в России адвокат обязан следовать рекомендациям, установленным Советом Федеральной палаты адвокатов Российской Федерации (Совет ФПА РФ). Советы адвокатских палат субъектов РФ также могут утверждать рекомендации, обязательные для всех адвокатов, состоящих в палате соответствующего субъекта.

Так 30 ноября 2009 г. Советом ФПА РФ утверждены Рекомендации по обеспечению адвокатской тайны и гарантий независимости адвоката при осуществлении адвокатами профессиональной деятельности.

Ключевой проблемой является отсутствие специализированных отраслевых технических регламентов. Текущая модель предполагает, что адвокат самостоятельно определяет уровень технической защиты, ориентируясь на общие требования законодательства и рекомендации ФПА РФ, что в условиях современных киберугроз создает риски компрометации профессиональной тайны [6].

США. Американская модель отличается высокой степенью детализации через систему прецедентов и нормативных актов Американской ассоциации юристов. На практике широко используется концепция «технологической компетентности», согласно которой адвокат обязан не только знать право, но и понимать риски используемых информационных систем. Основным техническим ориентиром выступают стандарты Национального института стандартов и технологий (NIST) [7].

Великобритания и Европейский Союз. В Великобритании акцент смещен на риск-ориентированный подход и обязательную сертификацию базовых уровней защиты. В ЕС определяющим фактором является Общий регламент по защите данных (GDPR), который накладывает на адвокатские образования обязанности по внедрению организационных и технических мер (шифрование, псевдонимизация), соответствующих актуальному уровню развития науки и техники [8].

Обобщая изученный опыт, в таблице 2 представлена сравнительная характеристика стандартов и норм, действующих в сфере защиты цифровых коммуникаций адвокатов и нотариусов.

Данные, приведенные в таблице 2, позволяют сделать вывод о глобальном переходе от добровольного соблюдения этических норм к императивной стандартизации технических средств защиты информации в деятельности адвокатуры. В отличие от российской модели, ориентированной на организационные меры и локализацию данных, международная практика накладывает на лиц, оказывающих юридическую помощь, прямую обязанность по внедрению сквозного шифрования и прохождению регулярного внешнего аудита киберустойчивости. Итоговые различия в правовых режимах подтверждают необходимость гармонизации отечественных стандартов с международными риск-ориентированными протоколами для обеспечения технологической независимости и соблюдения адвокатской тайны.

На следующем этапе рассмотрим более подробно технические аспекты выбора надежных цифровых каналов связи для обеспечения сохранности и защиты данных в деятельности адвоката.

На практике существует очень широкий спектр критериев и показателей, определяющих безопасность платформы или каналов цифровой коммуникации, используемых адвокатами, вследствие чего их достаточно

Таблица 2.

Сравнительная характеристика стандартов обеспечения информационной безопасности нотариусов в разных странах мира

Параметр сравнения	Российская Федерация	США	Великобритания	Европейский Союз
Нормативная база	Федеральный закон № 63-ФЗ, Кодекс профессиональной этики адвоката	Типовые правила профессиональной этики, Акты ассоциаций штатов	Правила поведения Управления по регулированию деятельности нотариусов	Общий регламент по защите данных (GDPR)
Регламентирующие технические стандарты	Государственные стандарты (ГОСТ) серии 57580 (носят рекомендательный характер)	Специальные публикации Национального института стандартов и технологий (NIST SP 800–53)	Программа «Основы кибербезопасности» (Cyber Essentials)	Международные стандарты ИСО/МЭК 27001 (ISO/IEC 27001)
Требования к криптографической защите	Обязательны для государственных информационных систем; для адвокатов — в рамках защиты персональных данных	Обязательное применение сквозного шифрования при передаче конфиденциальных сведений	Обязательное использование сертифицированных средств криптографии для регулируемых организаций	Строгие требования к шифрованию данных при хранении и передаче согласно принципам минимизации рисков
Регулирование использования облачных вычислений	Требование об обязательном размещении баз данных на территории Российской Федерации	Разрешено при условии проведения всесторонней проверки поставщика услуг на соответствие безопасности	Допускается при наличии детального руководства по управлению рисками в облачной среде	Регламентировано правилами трансграничной передачи данных и стандартами защиты частной жизни
Процедура подтверждения соответствия (сертификация)	В добровольном порядке для адвокатских образований	Требуется для крупных юридических организаций в рамках аудита контроля систем и организаций	Официальная государственная сертификация уровня «Плюс» для работы с государственным сектором	Обязательное подтверждение ответственности контролера данных через механизмы сертификации
Мониторинг и аудит безопасности	Преимущественно внутренний самоконтроль профессионального сообщества	Регулярный внешний аудит в соответствии с требованиями законодательства отдельных штатов	Систематический аудит в рамках общей системы управления правовыми рисками	Обязательная оценка воздействия на защиту данных при использовании новых технологий

(*составлено автором)*

проблематично перечислить, даже в отношении одного конкретного приложения или продукта. Также существует много скрытых опасностей, начиная от вредоносного кода или вирусов в драйверах до кражи идентификационных данных пользователей и уязвимостей межсайтового скриптинга. Кроме того, к сожалению, в большинстве случаев поставщики цифровых коммуникационных услуг предоставляют маркетинговую, а не техническую информацию о том, насколько безопасны их системы или как они обеспечивают сохранность данных. Отдельная проблема связана с тем, что провайдеры услуг не представляют адвокатам и адвокатским образованиям предварительного разрешения на проведение независимых тестов на проникновение в их системы.

Учитывая текущие угрозы и вызовы цифровой среды, не подлежит сомнению тот факт, что выбор и верификация защищенных каналов связи в деятельности адвоката требуют комплексного подхода, основанного на интеграции современных криптографических стандартов и строгом контроле аппаратной среды. С учетом данных требований, в таблице 3 выделены ключевые параметры выбора защищенных каналов и сред, которые базируются на технических регламентах международных институтов стандартизации и позволяют минимизировать риски компрометации профессиональной тайны адвокатов на всех уровнях передачи данных. Систематизация данных характеристик направлена на создание устойчивой ИТ-инфраструктуры, способной противодействовать как типовым сетевым угрозам, так и высокотехнологичным методам анализа трафика.

Технический анализ параметров, представленных в таблице 3, позволяет сделать вывод, что обеспечение надежности цифровых коммуникаций адвоката в современных условиях невозможно без перехода к архитектуре «нулевого доверия», предполагающей непрерывную динамическую верификацию каждого субъекта и устройства в сети. Совокупность использования протоколов с совершенной прямой секретностью и аппаратной изоляцией криптографических ключей формирует эшелонированную систему защиты, нивелирующую угрозы со стороны как внешних злоумышленников, так и администраторов облачных инфраструктур.

Таблица 3.

Технические критерии выбора и верификации защищенных каналов цифровой коммуникации в адвокатской деятельности

Технический параметр	Регламентируемая спецификация (на основе стандартов NIST/ISO)	Научно-техническое обоснование выбора
Протокол транспортного уровня	TLS 1.3 (RFC 8446) / IPsec (IKEv2)	Исключение векторов атак, основанных на принудительном понижении версии протокола, и обеспечение совершенной прямой секретности
Алгоритм асимметричного шифрования	ECDSA / EdDSA (эллиптические кривые P-384, Curve25519)	Повышение вычислительной стойкости при оптимизации длины ключа по сравнению с классическими алгоритмами факторизации целых чисел.
Алгоритм симметричного шифрования	AES-GCM (256 бит)	Реализация режима блочного шифрования с аутентификацией для одновременного обеспечения конфиденциальности и защиты данных.
Архитектура криптографической защиты	Сквозное шифрование (E2EE) / архитектура с «нулевым знанием» (Zero-Knowledge)	Техническое исключение возможности дешифрации контента на промежуточных узлах и стороне поставщика облачных услуг.
Механизмы аутентификации субъектов	Многофакторная аутентификация (стандарты FIDO2 / WebAuthn)	Минимизация вероятности компрометации канала вследствие несанкционированного использования учетных данных и методов социальной инженерии.
Контроль целостности и хеширование	SHA-3 (Keccak)	Обеспечение криптографической неизменности передаваемых массивов данных и устойчивости к поиску коллизий первого и второго рода.
Инфраструктура хранения ключей	Аппаратные модули безопасности (HSM) / Доверенный платформенный модуль (TPM 2.0)	Физическая изоляция секретных ключей от программной среды общего назначения и предотвращение их экстракции вредоносным ПО.

(составлено автором)

Таким образом, резюмируя результаты проведенного анализа, отметим, что в ответ на актуальные вызовы информационной революции и потребности сегодняшнего дня адвокаты в своей практике расширяют использование цифровых коммуникаций, которые позволяют им повышать эффективность своей работы и оказывать доверителям более квалифицированную юридическую помощь с использованием актуальных технологий. Однако эти удобства и новации сопровождаются повышенными рисками кибербезопасности, сохранности данных и защиты конфиденциальных сведений клиентов.

В статье рассмотрены вопросы, связанные с правовыми и техническими аспектами выбора надежных каналов связи. Отмечено, что актуальной является императивная тенденция к технологической стандартизации адвокатской деятельности. Это в свою очередь диктует необходимость внедрения в отечественную практику регламентов сквозного шифрования и многофакторной верификации субъектов. Сформулированные в работе требования к архитектуре каналов связи и протоколам шифрования закладывают основу для формирования единой методики верификации коммуникационных решений, минимизирующей влияние человеческого фактора и уязвимостей стороннего программного обеспечения на адвокатскую деятельность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фадеев А.В., Воронина П.А. Цифровизация адвокатской деятельности // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. №11–4, с. 234–242.
2. Советкина А.С., Лошкарёв А.В. Развитие цифровизации в сфере адвокатуры и адвокатской деятельности: преимущества и возможные недостатки // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2020. №9–2. С. 195–199.
3. Yong Ding, Weiguo Huang, Hai Liang, A Fast Cross-Chain Protocol Based on Trusted Notary Group for Metaverse // International Journal of Network Management. 2024. Volume 35, Issue 1. P. 19–22.
4. John Zeleznikow, The benefits and dangers of using machine learning to support making legal predictions // Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery. 2023. Volume 13, Issue 4. P. 71–78.
5. Коган М.И., Обеспечение сохранения адвокатской тайны при использовании адвокатом современных технологий и электронных девайсов // Вестник Университета имени О.Е. Кутафина. 2020. №11 (75). С. 218–223.
6. Hugo Mentzingen, Nuno António, Fernando Bacao Automation of Legal Precedents Retrieval: Findings from a Literature Review // International Journal of Intelligent Systems. 2023. Volume 3, Issue 17. P. 45–51.
7. Li Ge, Peng Yan Li Research on Network Data Monitoring and Legal Evidence Integration Based on Cloud Computing // Mobile Information Systems. 2022. Volume 9, Issue 1. P. 102–106.
8. Магдеева Д.И., Адвокатская тайна в цифровую эпоху: вызовы и способы защиты // Вестник Пензенского государственного университета. 2025. №2(50). С. 22–26.

© Короткий Игорь Игоревич (i.korotkiy@bk.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.19

СИСТЕМА СРАВНЕНИЯ ТЕКСТОВ: ЭТАПЫ ПРЕДОБРАБОТКИ И ОЦЕНКА ОРИГИНАЛЬНОСТИ ДОКУМЕНТОВ

TEXT COMPARISON SYSTEM: PREPROCESSING STAGES AND DOCUMENT ORIGINALITY ASSESSMENT

K. Krez
Y. Shneiderov
V. Golushko

Summary. This article presents a methodology for automated document originality assessment based on the integration of modern natural language processing methods and classical text comparison algorithms. The proposed approach includes a three-stage data processing algorithm: preliminary document cleaning and normalization, their semantic vectorization using the Sentence-BERT model, and subsequent similarity assessment using a hybrid algorithm. During the vectorization stage, the text is converted into 384-dimensional embeddings reflecting its semantic content, enabling efficient semantic searches for potential borrowing sources using approximate nearest neighbor search (ANS) algorithms. To accurately quantify the degree of similarity, the hashing shinnling method is used, ensuring deterministic comparison of text fragments. The developed algorithm automates the process of verifying the uniqueness of academic papers, reducing the complexity of manual verification, and increasing the reliability of the results. The proposed hybrid approach combines the high efficiency of semantic search with the accuracy of classical comparison methods and can be effectively applied when working with large text databases.

Keywords: vectorization of documents, evaluation of the originality of documents, equalization, embedding, shingle.

Крез Карина Сергеевна
Аспирант, УО Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь
karinakrez04@gmail.com
Шнейдеров Евгений Николаевич
Кандидат технических наук, доцент, УО Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь
shneiderov@bsuir.by
Голушко Вадим Игоревич
УО Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь
vadimgolushko2004@gmail.com

Аннотация. В статье представлена методика автоматизированной оценки оригинальности текстовых документов, основанная на интеграции современных методов обработки естественного языка и классических алгоритмов сравнения текста. Предложенный подход включает трехэтапный алгоритм обработки данных: предварительную очистку и нормализацию документов, их семантическую векторизацию с использованием модели Sentence-BERT и последующую оценку степени сходства с помощью гибридного алгоритма. На этапе векторизации текст преобразуется в 384-мерные вложения, отражающие его семантическое содержание, что позволяет эффективно проводить семантический поиск потенциальных источников заимствований с использованием алгоритмов приближенного поиска ближайшего соседа (ИНС). Для точной количественной оценки степени совпадения используется метод шинлинга с хешированием, обеспечивающий детерминированное сравнение фрагментов текста. Разработанный алгоритм позволяет автоматизировать процесс проверки уникальности научно-учебных работ, снижая сложность ручной проверки и повышая надежность результатов. Предложенный гибридный подход сочетает в себе высокую эффективность семантического поиска с точностью классических методов сравнения и может эффективно применяться при работе с большими текстовыми базами данных.

Ключевые слова: векторизация документов, оценка оригинальности документов, выравнивание, встраивание, шингл.

Введение

В контексте цифровизации образовательной и научной среды проблема проверки оригинальности текстовых документов приобретает особую актуальность. Ежегодный рост объема научных публикаций, курсовых и выпускных квалификационных работ приводит к усложнению задач по выявлению заимствований и объективной оценке уникальности материалов. Традиционные методы, основанные исключительно на лексическом совпадении фрагментов текста, все чаще оказываются недостаточными, поскольку не учитывают семантическую близость перефразированных или структурно модифицированных заимствований.

Современные достижения в области обработки естественного языка (далее — NLP) открывают новые возможности для построения интеллектуальных антиплагиатных систем, способных анализировать не только форму, но и смысл текста. Использование моделей нейронных сетей семейства BERT и технологий векторного представления (далее — эмбеддинг) позволяет перейти

от поверхностного сравнения строк к семантическому поиску и более точной оценке сходства документов.

Статья посвящена разработке и обоснованию комплексного подхода к автоматизированной проверке подлинности документов, сочетающего методы семантической векторизации и классические алгоритмы шинглирования. Предложенная методология в первую очередь ориентирована на применение в образовательной сфере и направлена на повышение точности, объективности и производительности систем обнаружения займов при работе с большими объемами текстовых данных.

Аналогичные алгоритмы для оценки оригинальности текста

Для повышения эффективности поиска в больших массивах документов используются методы MinHash и Locality-Sensitive Hashing (далле — LSH), которые позволяют аппроксимировать коэффициент Жаккара между наборами шинглов и значительно сократить время сравнения [1].

Теоретически этот подход был обоснован в работах А. Бродера, где в качестве количественных показателей заимствования были введены понятия «сходства» и «включительности» документов [2].

Несмотря на высокую точность обнаружения прямых копий, методы шинглирования имеют ряд ограничений: они чувствительны к перестановке слов, неустойчивы к перефразированию и не учитывают семантический контекст текста.

Значительный шаг вперед был сделан с появлением распределенных векторных представлений слов и документов. Модели Word2Vec и Doc2Vec позволяют отображать слова и тексты в непрерывном векторном пространстве, где близость векторов отражает семантическую близость понятий [4, 5].

Использование этих моделей в задачах по борьбе с плагиатом частично решило проблему синонимии и изменчивости формулировок. Документы сравниваются не по совпадению отдельных слов, а по близости их семантических представлений.

Однако эти методы имеют ограниченную способность учитывать сложный контекст и иерархию значений в длинных текстах. Кроме того, усреднение векторов слов часто приводит к потере структурной информации.

Современный этап развития систем оценки оригинальности связан с внедрением трансформерных нейронных сетей, прежде всего моделей семейства BERT. В отличие от предыдущих подходов, такие модели формируют контекстно-зависимые вложения, где значение слова определяется его окружением [6].

Особую роль в задачах сравнения текстов сыграла архитектура Sentence-BERT, предложенная Н. Реймерсом и И. Гуревичем, которая использует сиамскую сеть для получения компактных векторных представлений предложений и документов [7]. Эти эмбеддинги демонстрируют высокую корреляцию с оценками семантической близости, полученными человеком, и успешно используются в задачах кластеризации, поиска дубликатов и обнаружения займов.

В ряде работ предлагается комбинировать семантические эмбеддинги с алгоритмами приближенного ближайшего соседа (далее — ИНС) для масштабируемого поиска похожих документов в больших базах данных. Наиболее известными реализациями являются HNSW и FAISS, которые обеспечивают логарифмическую сложность поиска с минимальной потерей точности [8, 9].

В данной статье будет описан гибридный подход, сочетающий преимущества семантического анализа и классических детерминированных методов.

Типичная архитектура таких систем включает два уровня:

1. Семантический фильтр — на основе эмбеддингов нейронной сети и поиска ИНС выбирается ограниченное количество потенциально похожих документов.
2. Точный анализ — для выбранных кандидатов используются методы шинглинга, хеширования или другие методы символического сравнения для вычисления количественной меры совпадения.

Основные результаты

Первый этап, «Подготовка данных», включает очистку текста от структур сервиса и его нормализацию. Второй этап, «Векторизация документа», является ключом к преобразованию текстовой информации в машиночитаемый (далее — векторизация) формат. Для этой цели используется архитектура Sentence-BERT, которая генерирует многомерные векторные представления. Заключительный этап, «Расчет оригинальности», основан на поиске ближайших семантических соседей и детальном сравнении фрагментов текста (далее — шинглы) для количественной оценки сходства. Общая схема процесса показана на рисунке 1.

Этап 1. Подготовка данных.

Цель этого этапа — извлечение полезного текстового контента и удаление шумовых данных.

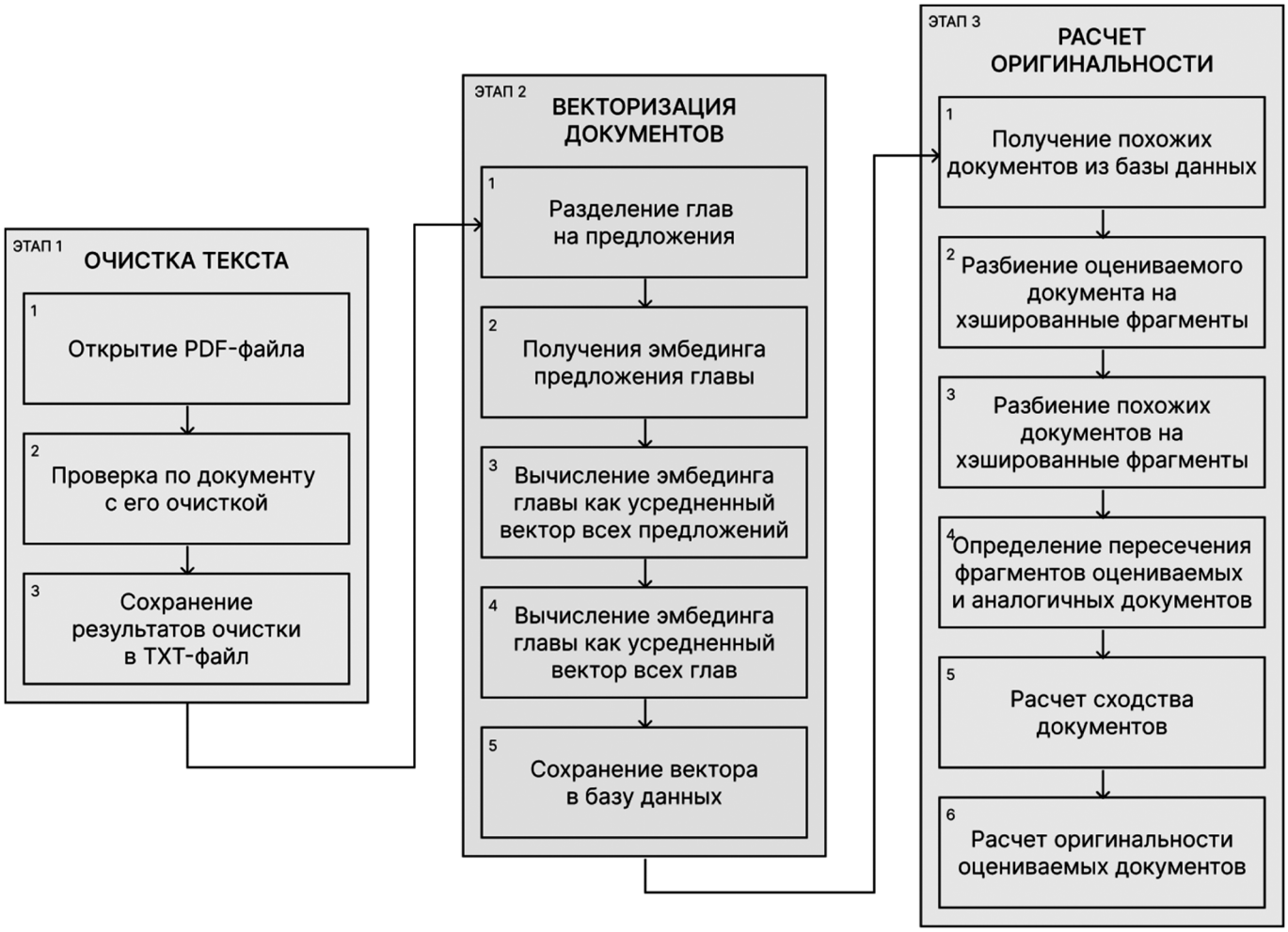


Рис. 1. Общая схема предварительной обработки документа

Этап 1.1. Открытие и чтение файлов *.pdf или *.word. На начальном этапе исходный файл читается постранично в формате *.pdf или *.word. Главная задача этапа — исключение элементов, не несущих семантическую нагрузку для анализа уникальности (так называемые «шумовые» строки). К ним относятся: титульные страницы, аннотации, содержание, ссылки, приложения, а также подписи к графическим объектам (например, строки, содержащие шаблоны «Рисунок…», «Таблица…») [10].

Этап 1.2. Прохождение документа с его очисткой. В процессе итерации по страницам формируется структурированный словарь данных. Ключами словаря являются названия структурных единиц текста (например: разделы, главы, подразделы), а значениями — очищенный текст, соответствующий этим разделам. Этот подход позволяет сохранить логическую структуру документа, что крайне важно для корректной векторизации. При формировании текста разделы разделяются между собой специальными маркерами — двойными переносами строк, что упрощает их последующую программную обработку.

Этап 1.3. Сохранение результата очистки в файл *.txt. Нормализованный текст сохраняется в промежуточный файл *.txt. Это решение обусловлено необходимостью разделения процессов предварительной обработки и анализа:

— при изменении модели векторизации повторная очистка исходного файла не требуется;
— этапы векторизации и вычисления уникальности технически разделены. Поскольку сравнение требует данных не только из текущего документа, но и из многих других документов из базы данных, передача данных исключительно через оперативную память неэффективна.

Этап 2. Векторизация документа. На этом этапе текстовая информация преобразуется в эмбеддинги, отражающие семантическое значение.

Этап 2.1. Разделение глав на предложения.

Текст, загруженный из TXT-файла, десериализуется в структуру данных. Содержимое каждой главы токенизируется на уровне разделения предложений, образуя список единиц для анализа.

Этап 2.2. Получение эмбеддинга предложений заголовка.

Каждое предложение преобразуется в вектор с использованием модели нейронной сети «paraphrase-MiniLM-L6-v2». Эта модель является модификацией архитектуры BERT [11], адаптированной библиотекой sentence-transformers (SBERT) [12] для задач семантического поиска. Используемая модель работает с векторами размерности 384 (в отличие от 768 для базового BERT), что обеспечивает баланс между точностью семантического представления и скоростью вычислений. Модель имеет 6 слоев трансформера, что также способствует повышению производительности. На рисунке 2 представлен график, где по оси X отложено количество измерений, а по оси Y — точность. Линии отражают различные задачи, для решения которых были обучены модели.

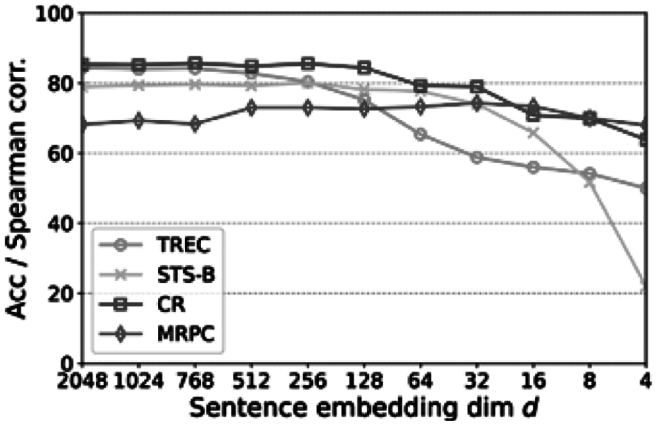


Рис. 2. График точности полученного результата в зависимости от размерности измерений

В данном исследовании по оси Y отложен коэффициент ранговой корреляции Спирмена для задачи оценки семантического сходства (STS-B) и индекс точности для задач классификации (TREC, CR, MRPC).

Используемые наборы данных характеризуются следующими параметрами:

— TREC: классификация вопросов (500 тестовых случаев, 6 классов);
— STS-B: оценка семантической близости предложений (1379 тестовых пар, 5-балльная шкала);
— CR: бинарная классификация тональности (3773 предложения);
— MRPC: определение парафраза (1726 тестовых пар).

Анализ представленных графических данных позволяет сделать вывод, что размерность вектора в 384 измерения является оптимальной для задачи семантического сходства. Дальнейшее увеличение размерности (до 512 и 768) не приводит к значительному увеличению метрик, в то время как уменьшение до 256 измерений демонстрирует сопоставимые результаты, что подтверждает избыточность многомерных векторов для задач такого типа.

Процесс токенизации и векторного кодирования:

1. Токенизатор BERT преобразует текст в последовательность идентификаторов (ID) с использованием статистического метода сегментации слов на подслова. Это позволяет эффективно обрабатывать редкие лексемы и слова с богатой морфологией.
2. Слова, отсутствующие в словаре, разлагаются. Например, токен «illumination» можно разделить на токены ['under', '##light', '##ka'], где префикс ## обозначает подтокены, не являющиеся началом слова.
3. Каждому токену присваивается вектор фиксированной размерности (в данном случае 384). Эти веса оптимизируются на этапе предварительного обучения и накапливают дистрибутивную и семантическую информацию о токене.

Для корректного функционирования модели в структуру входных данных интегрированы специальные управляющие токены:

— [CLS] (ID 101): размещается в начале последовательности; его конечное скрытое состояние используется в качестве агрегированного представления всей фразы для задач классификации;
— [SEP] (ID 102): служит разделителем между контекстными парами (например, в задачах анализа пар предложений) и указывает на конец последовательности.

Вектор всего документа вычисляется аналогичным образом: векторы всех глав усредняются и вычисляются по формуле 1. Полученный вектор представляет собой сжатое семантическое представление всего текста.

$$PE_{(pos,2i)} = \sin\sin\left(\frac{pos}{10000^{\frac{2i}{d\text{model}}}}\right), \quad (1)$$

где *PE* — позиционное встраивание, pos — позиция токена в последовательности (например, 0 для первого токена, 1 для второго и т. д.), *i* — индекс измерения в векторе позиционного встраивания (от 0 до *d_model*), *d_model* — размерность модели (количество измерений в векторе встраивания, 384).

Позиционные встраивания формируются на основе последовательности токенов, включая знаки препинания. Архитектура оригинальной модели BERT имеет 512 фиксированных позиционных индексов, что ограничивает максимальную длину входной последовательности соответствующим количеством токенов.

Встраивания типов токенов используются для решения задачи классификации пар предложений. В со-

временных версиях архитектуры этот механизм сохраняется для обеспечения структурной совместимости, но фактически не используется: всем токенам по умолчанию присваивается идентификатор сегмента «А». Полученный входной вектор формируется путем пошагового суммирования трех типов эмбеддингов (токенов, позиций и сегментов), после чего он передается в блоки кодировщика трансформера.

Отличительной особенностью моделей SBERT является наличие слоя пулинга после выходного слоя трансформера. Пулинг — это операция агрегирования признаков, направленная на получение фиксированного вектора исходных данных из последовательности векторов токенов. Рассматриваемая модель использует метод среднего пулинга (Mean Pooling), в котором окончательное представление предложения вычисляется как арифметическое среднее значений векторов всех его токенов.

Для формирования семантического корпуса документа реализован многоуровневый подход к агрегированию данных:

— вектор главы вычисляется как центроид в N-мерном пространстве путем нахождения арифметического среднего векторов всех предложений, составляющих эту главу;
— окончательный усредненный вектор, представляющий общее семантическое направление документа, сохраняется в базе данных векторов для последующего использования.

Например, возьмем 2 вектора в двумерном пространстве. Вектор 1 = (1, 2) и вектор 2 = (3, 4). Теперь найдем сумму векторов: это будет вектор суммы = (1 + 3, 2 + 4) = (4, 6). Чтобы получить вектор среднего значения, остается только разделить вектор суммы на 2, поскольку в сумме получилось 2 вектора: (4, 6)/2 = (4/2, 6/2) = (2, 3). Вектор суммы отражает общее направление, заданное векторами 1 и 2, и то же самое происходит с векторами предложений. Полученное среднее значение указывает общее направление предложений, а следовательно, и глав. Получив вектор главы, он добавляется к списку векторов всех глав и продолжается по документу до тех пор, пока не будут получены векторы всех глав. После этого выполняется та же операция, уже с векторами глав, и получается вектор документа, который сохраняется в базе данных.

Этап 3. Оценка оригинальности документа.

Этап 3.1. Семантический поиск и обоснование выборки.

Для выявления потенциальных источников заимствований выполняется поиск семантически схожих векторов в базе данных. Алгоритм извлекает пять наиболее релевантных документов (k=5). Этот размер выборки эмпирически обоснован: наибольшая степень сходимости текста наблюдается среди первых результатов. Расширение выборки за пределы пяти кандидатов нецелесообразно, поскольку включение тематически отдаленных документов приводит к неоправданному снижению вычислительной эффективности и риску искажения окончательной оценки путем анализа нерелевантного контента.

Поиск реализуется с использованием алгоритма приблизительного ближайшего соседа (даллее — ANN) [13]. Использование ANN вместо метода полного перебора обусловлено необходимостью высокой вычислительной эффективности при работе с большими объемами данных. Ошибка алгоритма ИНС устраняется на последующих этапах анализа, поскольку векторный поиск служит лишь фильтром для отбора кандидатов, а окончательный расчет основан на детерминированном сравнении текстовых сигнатур.

Этап 3.2. Метод шинглирования и хеширования.

Для проведения детального сравнения документов используется метод N-грамм (даллее — шинглов). В данной статье используется размер шингла n=5. Процесс декомпозиции текста реализуется по принципу «скользящего окна»: при сдвиге окна на одно слово формируется новый перекрывающийся фрагмент.

Например, для фразы «Кот сидит на ковре и смотрит в окно» при n=5 формируется набор: [Кот сидит на ковре и][сидит на ковре и смотрит]... и т. д. Для оптимизации процесса сопоставления каждый шингл преобразуется в уникальный числовой идентификатор — хеш-код. Хэширование гарантирует, что идентичные фрагменты текста будут иметь одинаковые значения. Для каждого документа генерируется множество уникальных хешей, что автоматически исключает дублирование фрагментов в одном и том же тексте.

Этап 3.3. Математическая модель для расчета оригинальности. Для определения степени сходства анализируемого документа с найденным источником.

$$S = \frac{I}{U}, \qquad (2)$$

где: I — количество хешей анализируемого документа, найденных в наборе хешей найденных источников (пересечение); U — общее количество уникальных хешей (длина набора) целевого документа. Показатель S варьируется в диапазоне [0; 1], где 1 соответствует полному совпадению всех текстовых фрагментов, а 0 — полному отсутствию идентичных шинглов.

Итоговый показатель оригинальности документа (в процентах) рассчитывается по формуле 3:

$$O = 100 - (S \cdot 100), \quad (3)$$

где O — оригинальность документа, S — сходство документов.

Поскольку наше сходство определяется в диапазоне от 0 до 1, то для получения процента мы умножаем на 100. Процент оригинальности можно получить, вычитая процент сходства из 100.

Заключение

Авторы статьи разработали и обосновали комплексную методологию автоматизированной проверки уникальности текстовых документов, ориентированную на применение в образовательной сфере. Предложенная система решает проблему проверки содержания с помощью трехэтапного конвейера обработки данных, сочетающего современные методы обработки естественного языка и классические алгоритмы сравнения:

1. Предварительная обработка и нормализация — реализован эффективный механизм очистки документов (форматы *.pdf или *. word) от «шумовых» элементов (титульные страницы, библиографии, подписи к рисункам) с использованием регулярных выражений.
2. Семантическая векторизация — выбрана модель нейронной сети Sentence-BERT. Она преобразует текст в 384-мерные векторы, что, по мнению авторов, является оптимальным балансом между точностью семантического представления и скоростью вычислений. Используется иерархический подход: векторы предложений объединяются в векторы глав, а затем в вектор документа.
3. Гибридный алгоритм поиска и сравнения — для быстрого отбора кандидатов используется приближенный алгоритм поиска ближайшего соседа (ANN), который находит 5 наиболее семантически близких документов в базе данных.

Для точного расчета процента оригинальности используется детерминированный метод сравнения хешированных шинглов (n-грамм длиной 5 слов). Итоговая оценка основана на коэффициенте (пересечении множеств шинглов).

Представленный алгоритм позволяет полностью автоматизировать процесс проверки различных документов, таких как статьи, курсовые работы, диссертации и лабораторные работы, минимизируя ручной труд. Гибридный подход (ANN для скорости и шинглы для точности) обеспечивает высокую производительность при работе с большими базами данных, а использование моделей BERT позволяет учитывать семантический контекст при первоначальном отборе, отфильтровывая нерелевантные документы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Leskovec J., Rajaraman A., Ullman J. Mining of Massive Datasets. — Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
2. Broder A.Z. On the resemblance and containment of documents // Compression and Complexity of Sequences. — 1997. — P. 21–29.
3. Salton G., McGill M. Introduction to Modern Information Retrieval. — New York: McGraw-Hill, 1983.
4. Mikolov T. et al. Efficient estimation of word representations in vector space // arXiv preprint arXiv:1301.3781, 2013.
5. Le Q., Mikolov T. Distributed representations of sentences and documents // Proceedings of ICML, 2014. — P. 1188–1196.
6. Devlin J. et al. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding // NAACL-HLT, 2019. — P. 4171–4186.
7. Reimers N., Gurevych I. Sentence-BERT: Sentence embeddings using Siamese BERT-networks // EMNLP-IJCNLP, 2019. — P. 3982–3992.
8. Johnson J., Douze M., Jégou H. Billion-scale similarity search with GPUs // IEEE Big Data, 2017.
9. Malkov Y., Yashunin D. Efficient and robust approximate nearest neighbor search using HNSW // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020. — Vol. 42, No. 4. — P. 824–836.
10. Крез К.С. Разработка модуля для предобработки документов обнаружения заимствований / Крез К.С., Ефименко Д.Д., Войнилович Н.Ю. // Информационные технологии и системы 2025: материалы Междунар. науч. конф., Минск, 16–17 нояб. 2023 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Л.Ю. Шилин [и др.]. — Минск, 2025. — С. 75–76.
11. BERT Documentation // Hugging Face: [website]. — URL: https://huggingface.co/docs/transformers/model_doc/bert (accessed: 04.11.2025).
12. Sentence Transformers Documentation // SBERT.net: [website]. — URL: https://sbert.net/ (accessed: 04.11.2025).
13. [Understanding Approximate Nearest Neighbor (ANN) // Elastic Blog: [website]. — URL: https://www.elastic.co/blog/understanding-ann (accessed: 10.11.2025).

© Крез Карина Сергеевна (karinakrez04@gmail.com); Шнейдеров Евгений Николаевич (shneiderov@bsuir.by);
Голушко Вадим Игоревич (vadimgolushko2004@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.21

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ГРАДИЕНТНОГО БУСТИНГА ДЛЯ ДЕТЕКЦИИ ФИНАНСОВОГО МОШЕННИЧЕСТВА

APPLICATION OF GRADIENT BOOSTING ALGORITHMS FOR DETECTING FINANCIAL FRAUD

N. Kurtash
S. Bryutova
S. Molodyakov

Summary. The current problem of automatic detection of fraudulent transactions in the banking sector, complicated by a strong imbalance in data classes, is considered. The evolution of boosting methods from the classic AdaBoost to the modern XGBoost is presented. A comparative analysis of the basic and optimized model configurations was performed on a combined dataset of 300,000 transactions with a 5 % fraud rate. Hyperparameter optimization was performed using a Bayesian approach (the TPE algorithm of the Optuna framework). The results showed an increase in F1-score by 57.8 % and Precision by 135.6 %, indicating a significant reduction in false positives. The dominant influence of tree depth and learning rate on classification quality was revealed. It was demonstrated that proper gradient boosting tuning allows for effective class separation without the use of additional data balancing methods.

Keywords: machine learning, gradient boosting, AdaBoost, XGBoost, fraud detection, unbalanced data, hyperparameter optimization.

Курташ Никита Сергеевич
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
nikitakurtash@gmail.com
Брютова София Даниловна
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
britovasofia@gmail.com
Молодяков Сергей Александрович
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
samolodyakov@mail.ru

Аннотация. Рассматривается актуальная проблема автоматического выявления мошеннических транзакций в банковской сфере, осложнённая сильной несбалансированностью классов данных. Представлена эволюция методов бустинга от классического AdaBoost до современного XGBoost. На комбинированном датасете из 300 000 транзакций с 5 % долей мошенничества проведён сравнительный анализ базовой и оптимизированной конфигураций модели. Оптимизация гиперпараметров выполнена с применением байесовского подхода (алгоритм TPE фреймворка Optuna). Результаты показали рост F1-score на 57,8 % и Precision на 135,6 %, что свидетельствует о значительном сокращении ложноположительных срабатываний. Выявлено доминирующее влияние глубины деревьев и скорости обучения на качество классификации. Продемонстрировано, что правильная настройка градиентного бустинга позволяет эффективно разделять классы без применения дополнительных методов балансировки данных.

Ключевые слова: машинное обучение, градиентный бустинг, AdaBoost, XGBoost, детекция мошенничества, несбалансированные данные, оптимизация гиперпараметров.

Введение

Детекция мошеннических операций — актуальная задача в финансовой сфере, решаемая в том числе с помощью машинного обучения. По данным Nilson Report [1], глобальные потери от мошенничества с платежными картами в 2023 году превысили 32 миллиарда долларов. Это делает задачу автоматического обнаружения подозрительных транзакций важной и практически значимой для исследования методов классификации.

Особую сложность задача детекции мошенничества представляет из-за сильной несбалансированности классов: доля мошеннических операций обычно составляет менее 1–5 % от общего объема транзакций. В таких условиях традиционные метрики качества, такие как accuracy, становятся малоинформативными, а модели склонны к предсказанию только мажоритарного класса. Это требует применения специализированных алгоритмов и метрик оценки качества.

Среди методов машинного обучения хорошо зарекомендовали себя ансамблевые алгоритмы, в частности методы бустинга. Алгоритм AdaBoost (Adaptive Boosting), предложенный Фройндом и Шапире в 1997 году, стал основой для развития целого семейства методов. Современные реализации градиентного бустинга — XGBoost, LightGBM и CatBoost — активно применяются для работы с табличными данными и часто показывают высокие результаты в соревнованиях по машинному обучению.

Целью данной работы является исследование эффективности алгоритмов градиентного бустинга в задаче детекции мошеннических транзакций, анализ влияния ключевых гиперпараметров на качество классификации и демонстрация потенциала оптимизации базовых конфигураций моделей.

Теоретические основы алгоритмов бустинга

A. Классический алгоритм AdaBoost

Бустинг (boosting) представляет собой мета-алгоритм машинного обучения, основная идея которого — комбинирование множества слабых классификаторов в единую сильную модель. Алгоритм AdaBoost (Adaptive Boosting), предложенный Freund и Schapire [2], стал первым успешным алгоритмом бустинга и заложил теоретический фундамент для последующего развития этого направления.

В AdaBoost каждому образцу обучающей выборки присваивается вес, который адаптивно изменяется в процессе обучения. На каждой итерации строится новый слабый классификатор (обычно решающий пень — decision stump), после чего веса образцов пересчитываются: неверно классифицированные примеры получают больший вес, что заставляет последующие классификаторы фокусироваться на сложных случаях. Итоговое предсказание формируется как взвешенное голосование всех построенных классификаторов.

Математически AdaBoost минимизирует экспоненциальную функцию потерь. Для бинарной классификации с метками $y \in \{-1, +1\}$ итоговый классификатор имеет вид $H(x) = \text{sign}\left(\sum \alpha_t h_t(x)\right)$, где h_t — слабые классификаторы, α_t — их веса, определяемые качеством классификации на текущей итерации [3].

B. Градиентный бустинг и XGBoost

Градиентный бустинг, предложенный Friedman [4], обобщил идеи AdaBoost, интерпретировав бустинг как градиентный спуск в функциональном пространстве. Вместо изменения весов образцов, градиентный бустинг на каждой итерации аппроксимирует градиент функции потерь, что позволяет работать с произвольными дифференцируемыми функциями потерь.

XGBoost (eXtreme Gradient Boosting), разработанный Chen и Guestrin [5], представляет собой оптимизированную реализацию градиентного бустинга. Главными улучшениями стали регуляризация второго порядка для предотвращения переобучения, эффективная обработка разреженных данных и поддержка параллельных вычислений. В отличие от классического градиентного бустинга, XGBoost использует аппроксимацию функции потерь разложением Тейлора до второго порядка, что позволяет учитывать кривизну функции потерь.

Целевая функция XGBoost на итерации t имеет вид:

$$L^{(t)} = \sum_i \left[g_i f_t(x_i) + \frac{1}{2} h_i f_t^2(x_i) \right] + \gamma T + \frac{1}{2}\lambda \sum_j w_j^2$$

где g_i и h_i — градиент и гессиан функции потерь соответственно, f_t — предсказание нового дерева, T — количество листьев, w_j — веса листьев, γ и λ — коэффициенты регуляризации. Параметр γ штрафует за сложность дерева (число листьев), а λ — за величину весов в листьях, что помогает контролировать переобучение.

C. Применение бустинга в задачах детекции мошенничества

Исследования последних лет демонстрируют высокую эффективность алгоритмов бустинга в разных задачах детекции в том числе и в детекции финансового мошенничества. В работе Ileberi и др. [6] комбинация AdaBoost с методом SMOTE позволила достичь точности 99,67 % на европейском датасете кредитных карт.

Randhawa и др. [7] исследовали устойчивость ансамбля на основе AdaBoost к зашумлённым данным. Авторы искусственно добавляли шум в обучающую выборку и измеряли качество классификации с помощью коэффициента корреляции Мэтьюса (MCC). Даже при добавлении 30 % шума модель сохранила MCC = 0,942, что говорит о высокой робастности бустинга — модель все так же верно классифицирует транзакции несмотря на значительное искажение данных.

Еще одним преимуществом алгоритмов бустинга является возможность анализа важности признаков для обеспечения интерпретируемости моделей [8].

Методология исследования

A. Характеристика набора данных

Для проведения экспериментов использовался датасет Credit Card Fraud Detection [11], предоставленный исследовательской группой ULB Machine Learning Group (Université Libre de Bruxelles) и размещённый на платформе Kaggle. Датасет содержит реальные транзакции европейских держателей кредитных карт за сентябрь 2013 года.

Набор данных включает 284 807 транзакций, из которых 492 (0,172 %) являются мошенническими. В целях обеспечения конфиденциальности исходные признаки были преобразованы методом главных компонент (PCA),

в результате чего получены 28 анонимизированных числовых признаков V1–V28. Признаки Time (время с момента первой транзакции) и Amount (сумма транзакции) не подвергались PCA-преобразованию. Целевая переменная Class принимает значение 1 для мошеннических транзакций и 0 для легитимных.

Для экспериментов датасет был дополнен синтетическими записями до 300 000 транзакций с сохранением структуры признаков и увеличением доли мошеннических операций до 5 % (15 000 записей). Такое соотношение позволяет исследовать поведение модели в условиях умеренного дисбаланса классов. Данные были разделены на обучающую (80 %) и тестовую (20 %) выборки методом стратифицированного разделения. Все признаки были стандартизированы.

B. Архитектура модели и гиперпараметры

В качестве основного алгоритма использовался XGBoost. Он был выбран из-за высокой производительности на табличных данных, встроенной поддержки несбалансированных классов через параметр scale_pos_weight, наличия механизмов регуляризации и возможности GPU-ускорения.

Исследуемые гиперпараметры модели представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Пространство поиска гиперпараметров

Параметр	Диапазон	Описание
n_estimators	200–1500	Количество деревьев в ансамбле
learning_rate	0.01–0.3	Скорость обучения
max_depth	3–12	Максимальная глубина деревьев
min_child_weight	1–10	Минимальная сумма весов в листе
subsample	0.6–1.0	Доля образцов для каждого дерева
colsample_bytree	0.6–1.0	Доля признаков для каждого дерева
gamma	0–5	Минимальное улучшение для разбиения

C. Процедура оптимизации

Для поиска оптимальной конфигурации гиперпараметров использовался фреймворк Optuna [9] с алгоритмом Tree-structured Parzen Estimator (TPE). TPE относится к методам байесовской оптимизации, он на основе результатов предыдущих экспериментов алгоритм строит вероятностные модели для хороших и плохих конфигураций параметров, а затем выбирает следующую точку для исследования так, чтобы максимизировать вероятность улучшения.

В качестве целевой функции была выбрана максимизация метрики F1-score. Эта метрика представляет собой гармоническое среднее между Precision (точностью) и Recall (полнотой) и вычисляется как $F1 = 2 \cdot (Precision \cdot Recall) / (Precision + Recall)$. F1-score хорошо подходит для несбалансированных данных, так как он учитывает и способность модели не давать ложных срабатываний, и способность находить все положительные примеры.

В процессе исследования было проведено 100 экспериментов с различными комбинациями гиперпараметров. Optuna автоматически управляет процессом поиска: первые 10 экспериментов выполняются со случайными параметрами для накопления начальной статистики, после чего алгоритм TPE начинает направленный поиск в перспективных областях пространства параметров.

D. Метрики оценки качества

Оценка качества моделей проводилась с использованием набора разных метрик. Так, Accuracy отражает общую долю правильных предсказаний. Precision показывает, какая доля транзакций, помеченных как мошеннические, действительно является таковыми. Recall измеряет, какую долю реальных мошеннических транзакций удалось обнаружить. F1-score объединяет Precision и Recall в одну метрику. ROC-AUC характеризует способность модели разделять классы при различных порогах классификации.

Результаты экспериментов

A. Сравнительный анализ моделей

Базовая модель XGBoost с параметрами по умолчанию (100 деревьев, скорость обучения 0.1) сравнивалась с оптимизированной моделью. В ходе оптимизации лучший результат был достигнут на 61-й итерации. Найденная конфигурация сильно отличается от базовой: модель использует значительно больше деревьев (1254 вместо 100) при меньшей скорости обучения (0.026 вместо 0.1), а также более глубокие деревья (глубина 10). Такое сочетание позволяет модели постепенно и аккуратно обучаться на сложных паттернах данных.

Результаты сравнения представлены в таблице 2.

Целевая метрика F1-score, которую мы максимизировали в ходе оптимизации, выросла с 0.5284 до 0.8336, что составляет +57.75 %. Вместе с этим значение Precision выросло более чем в 2,3 раза (с 0.3949 до 0.9303).

B. Анализ качества классификации

Для оценки качества разделения классов была рассчитана площадь под ROC-кривой (AUC). У базовой моде-

Таблица 2.

Сравнение метрик базовой и оптимизированной моделей

Метрика	Базовая	Оптимизированная	Изменение
Accuracy	0.9160	0.9822	+7.23%
Precision	0.3949	0.9303	+135.61%
Recall	0.7986	0.7551	−5.45%
F1-score	0.5284	0.8336	+57.75%
ROC-AUC	0.9022	0.9158	+1.51%

ли AUC составил 0.9022, у оптимизированной — 0.9158. Хотя разница в абсолютных значениях невелика (+1.5 %), обе модели демонстрируют хорошую способность разделять классы.

Матрицы ошибок (рис. 1) позволяют детально проанализировать распределение предсказаний моделей.

Анализ матриц ошибок подсвечивает главное практическое улучшение: количество ложноположительных срабатываний сократилось с 4328 до 200, то есть в 21.6 раза. Это означает, что оптимизированная модель значительно реже ошибочно блокирует легитимные транзакции, что напрямую влияет на удобство пользователей и снижает нагрузку на службу поддержки. При этом модель по-прежнему обнаруживает большинство мошеннических транзакций: 2670 из 3536 (75.5 %).

C. Анализ важности признаков

Одним из преимуществ градиентного бустинга является возможность оценки важности признаков. На рисунке 2 представлены 15 наиболее важных признаков оптимизированной модели.

Наиболее важными признаками оказались V25, V23, V18 и V24. Относительно равномерное распределение важности среди топ-15 признаков показывает, что модель использует информацию из различных источников, не опираясь чрезмерно на один из признаков.

Обсуждение результатов

Полученные результаты демонстрируют эффективность градиентного бустинга в задаче детекции мошенничества и подтверждают важность настройки гиперпараметров. Наиболее значимым результатом является рост Precision более чем в 2,3 раза (на 135.6 %). Из всех транзакций, помеченных системой как подозрительные, подавляющее большинство действительно являются мошенническими. Для финансовых организаций это критически важно — каждое ложноположительное срабатывание означает заблокированную легитимную транзакцию, недовольного клиента и затраты на ручную проверку. Незначительное снижение Recall (−5.45 %) является приемлемым компромиссом. Модель по-прежнему обнаруживает 75.5 % мошеннических транзакций, при этом существенно сокращая ложные срабатывания.

Анализ оптимальной конфигурации выявил важную особенность: лучшие результаты достигаются при низкой скорости обучения (0.026) в сочетании с большим количеством деревьев (1254). Это совпадает с наблюдением, что постепенное обучение с большим числом итераций способствует лучшей генерализации модели [10].

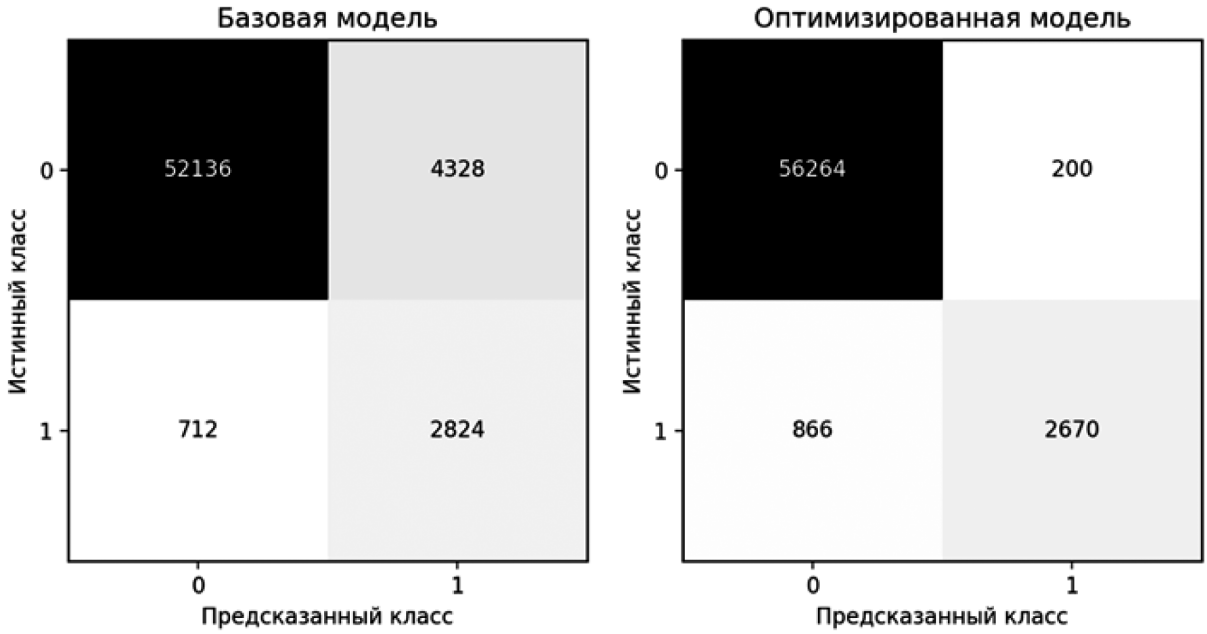


Рис. 1. Матрицы ошибок базовой и оптимизированной моделей

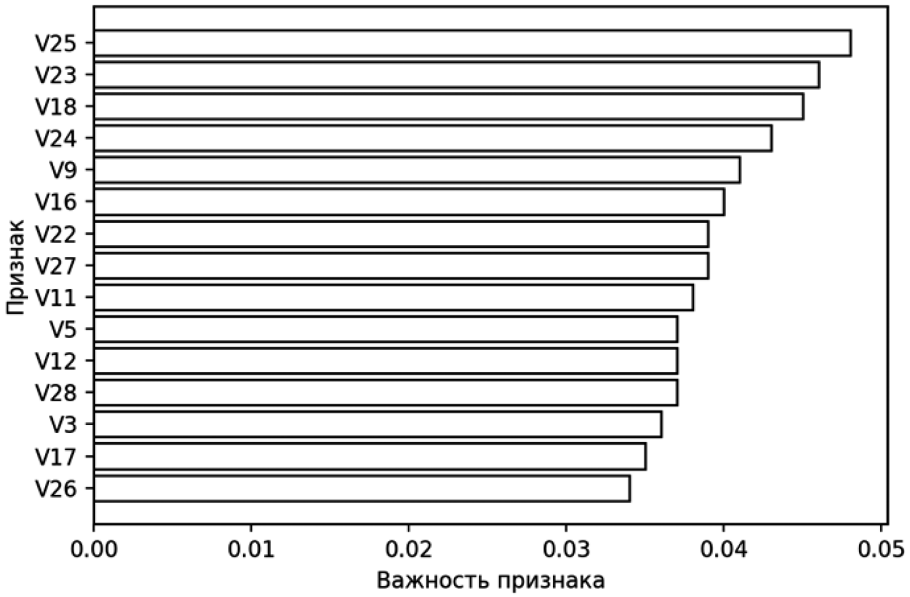


Рис. 2. Важность признаков оптимизированной модели (топ-15)

Глубина деревьев 10 говорит о том, что для данной задачи модели необходимо строить достаточно сложные правила классификации, чтобы уловить неочевидные паттерны мошеннического поведения.

Полученный F1-score = 0.8336 сопоставим с результатами Ileberi и др. [6] и Randhawa и др. [7], однако наше исследование проводилось без использования методов передискретизации, таких как SMOTE. Это важный результат: правильно настроенный градиентный бустинг способен эффективно работать с несбалансированными данными из коробки, без дополнительных этапов предобработки, которые усложняют пайплайн и могут исказить данные.

Заключение

В работе исследована эффективность алгоритмов градиентного бустинга в задаче детекции мошеннических транзакций. Экспериментально показано, что алгоритм XGBoost с оптимизированными гиперпараметрами существенно превосходит базовую конфигурацию. F1-score вырос на 57.75 %, а Precision — на 135.61 %.

По результатам исследования сформулированы следующие выводы. Во-первых, алгоритмы градиентного бустинга демонстрируют высокую эффективность в задачах детекции мошенничества на несбалансированных данных, что подтверждается значительным улучшением всех ключевых метрик качества. Во-вторых, настройка гиперпараметров оказывает критическое влияние на качество классификации: разница между базовой и оптимизированной конфигурациями составила более 50% по метрике F1-score. В-третьих, среди исследованных параметров наибольшее влияние на результат оказывают глубина деревьев и скорость обучения — именно их правильное сочетание позволяет модели находить сложные паттерны в данных без переобучения. В-четвёртых, при правильной настройке градиентный бустинг способен эффективно работать с несбалансированными данными без применения дополнительных методов балансировки классов, таких как SMOTE или взвешивание классов, что упрощает построение практических систем детекции.

Практическая значимость работы состоит в демонстрации возможности существенного повышения эффективности систем детекции мошенничества путём систематической оптимизации моделей машинного обучения. Предложенный подход может быть адаптирован для других задач классификации на несбалансированных данных.

В качестве направлений дальнейших исследований можно выделить сравнительный анализ различных алгоритмов бустинга (LightGBM, CatBoost), исследование комбинации градиентного бустинга с методами балансировки классов, а также адаптацию подхода для онлайн-обучения в потоковых данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Card Fraud Losses Reach $32.34 Billion [Электронный ресурс] // Nilson Report. — 2023. — December. — URL: https://nilsonreport.com (дата обращения: 15.12.2025).
2. Freund Y.A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting / Y. Freund, R.E. Schapire // Journal of Computer and System Sciences. — 1997. — Vol. 55, № 1. — P. 119–139. — DOI: 10.1006/jcss.1997.1504. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002200009791504X
3. Schapire R.E. Explaining AdaBoost / R.E. Schapire // Empirical Inference: Festschrift in Honor of Vladimir N. Vapnik / eds. B. Schölkopf, Z. Luo, V. Vovk. — Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. — P. 37–52. — DOI: 10.1007/978-3-642-41136-6_5. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-41136-6_5
4. Friedman J.H. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine / J.H. Friedman // The Annals of Statistics. — 2001. — Vol. 29, № 5. — P. 1189–1232. — DOI: 10.1214/aos/1013203451. — URL: https://www.researchgate.net/publication/2424824.
5. Chen T. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System / T. Chen, C. Guestrin // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (San Francisco, August 13–17, 2016). — New York: ACM, 2016. — P. 785–794. — DOI: 10.1145/2939672.2939785. — URL: https://dl.acm.org/doi/10.1145/2939672.2939785.
6. Ileberi E. Performance Evaluation of Machine Learning Methods for Credit Card Fraud Detection Using SMOTE and AdaBoost / E. Ileberi, Y. Sun, Z. Wang // IEEE Access. — 2021. — Vol. 9. — P. 165286–165294. — DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3134330. — URL: https://www.researchgate.net/publication/357077948.
7. Randhawa K. Credit Card Fraud Detection Using AdaBoost and Majority Voting / K. Randhawa, C.K. Loo, M. Seera [et al.] // IEEE Access. — 2018. — Vol. 6. — P. 14277–14284. — DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2806420. — URL: https://www.researchgate.net/publication/323213023
8. Bentéjac C.A Comparative Analysis of Gradient Boosting Algorithms / C. Bentéjac, A. Csörgő, G. Martínez-Muñoz // Artificial Intelligence Review. — 2021. — Vol. 54, № 3. — P. 1937–1967. — DOI: 10.1007/s10462-020-09896-5. — URL: https://dl.acm.org/doi/abs/10.1007/s10462-020-09896-5
9. Akiba T. Optuna: A Next-generation Hyperparameter Optimization Framework / T. Akiba, S. Sano, T. Yanase [et al.] // Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining (Anchorage, August 4–8, 2019). — New York: ACM, 2019. — P. 2623–2631. — DOI: 10.1145/3292500.3330701. — URL: https://arxiv.org/abs/1907.10902.
10. Hastie T. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman. — 2nd ed. — New York: Springer, 2009. — 745 p. — (Springer Series in Statistics).
11. Credit Card Fraud Detection [Электронный ресурс] / ULB Machine Learning Group // Kaggle. — 2018. — URL: https://www.kaggle.com/datasets/mlg-ulb/creditcardfraud (дата обращения: 15.12.2025).

© Курташ Никита Сергеевич (nikitakurtash@gmail.com); Брютова София Даниловна (britovasofia@gmail.com);
Молодяков Сергей Александрович (samolodyakov@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.23

О БИФУРКАЦИЯХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ОРБИТ В ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НА ПЛОСКОСТИ

ON BIFURCATIONS OF PERIODIC ORBITS IN DYNAMICAL SYSTEMS ON A PLANE

A. Morozov
D. Bulekbaev

Summary. Mathematical models of nonlinear oscillations are considered. Based on numerical modeling, bifurcation curves corresponding to the generation of limit orbits from heteroclinic and homoclinic orbits are constructed. This highlights the areas in the parameter space that correspond to stable stationary oscillations. The classical results of A.A. Andronov and E.A. Leontovich were used.

Keywords: oscillations, phase plane, separatrix contour, separatrix loop, stable orbit bifurcation.

Морозов Алексей Валентинович
Кандидат физико-математических наук, профессор,
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
Alex.morozof@gmail.com
Булекбаев Дастанбек Абдыкалыкович
Доктор технических наук, доцент,
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
atiman@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются математические модели нелинейных колебаний. На основе численного моделирования строятся бифуркационные кривые, отвечающие рождению предельных орбит из гетероклинических и гомоклинических орбит. Тем самым выделяются области в пространстве параметров, которым отвечают устойчивые стационарные колебания. Использовались классические результаты А.А. Андронова и Е.А. Леонтович.

Ключевые слова: колебания, фазовая плоскость, сепаратрисный контур, петля сепаратрисы, бифуркация устойчивой орбиты.

Введение

Хорошо известно, что в теории двумерных автономных систем существует ряд сценариев рождения устойчивых периодических движений, которым на практике отвечают рабочие режимы технических устройств. Особый интерес, при этом, представляет задача построения областей в пространстве параметров, в которых такие режимы наблюдаются и обладают свойством притяжения (устойчивости). В настоящей статье рассматриваются две двухпараметрические динамические модели, для которых известны теоремы существования о рождении периодических движений из особых орбит, связывающих седловые состояния равновесия. С помощью численного анализа на плоскости параметров для рассматриваемых моделей строятся границы областей устойчивости.

Модель А

Рассмотрим уравнение динамики нелинейного осциллятора

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \mu\left(\alpha x^2 - 1\right)\frac{dx}{dt} + x - x^3 = 0 \qquad (1)$$

и эквивалентную ему динамическую систему [1–3]

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = y, \\ \dfrac{dy}{dt} = -\mu\left(\alpha x^2 - 1\right)y - x + x^3 \end{cases} \qquad (2)$$

В (1), (2) $x = x(t), t$ – время, μ, α – положительные параметры.

Система (2) имеет следующе состояния равновесия: $C_0(0,0), C_1(-1,0), C_2(1,0)$, причем C_1 и C_2 всегда седлового типа.

Рассмотрим для начала консервативный случай, отвечающий параметру $\mu = 0$. При этом (2) интегрируема, и ее первый интеграл имеет вид

$$\frac{y^2}{2} + \frac{x^2}{2} - \frac{x^4}{4} = E = \text{const} \qquad (3)$$

Инвариантные кривые, отвечающие уравнению (3) изображены на рис. 1. Нетрудно проверить, что при $E = \frac{1}{4}$ уравнение (3) задает: 1) две сепаратрисы, идущие из седла в седло образующие сепаратрисный контур, 2) две сепаратрисы, исходящие из седел и две входящие в седла и, 3) состояния равновесия $C_{1,2}$. При $E \in \left(0, \frac{1}{4}\right)$ уравнение (3) задает семейство периодических орбит (циклов). При $E = 0$ (3) определяет состояние равновесия C_0. При $E > \frac{1}{4}$ (3) описывает семейство незамкнутых орбит, охватывающих сепаратрисный контур.

В диссипативном случае ($\alpha = 0$ и $\mu < 0$) в силу свойства поворота векторного поля и неравенства

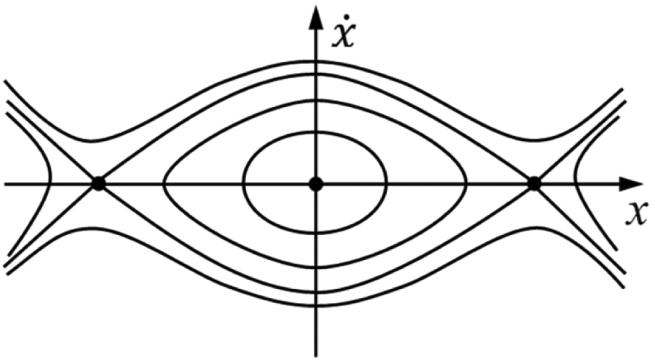


Рис. 1. Орбиты системы (2) ($\mu = 0$)

$\frac{d}{dt}\left(\frac{y^2}{2}+\frac{x^2}{2}-\frac{x^4}{4}\right) = \mu y^2 < 0$ фазовый портрет претерпит изменения, отмеченные на рис. 2. В этом случае, входящие в первый интеграл, инвариантные кривые становятся бесконтактными с направлением поля внутрь. Состояние равновесия C_0 при этом становится устойчивым фокусом (или узлом).

Для параметров $\alpha = 0$ и $\mu > 0$ фазовая картина меняется: состояние равновесия C_0 становится неустойчивый фокусом (рис. 3), если $0 < \mu < 2$ или неустойчивым узлом, если $\mu > 2$.

Рождение периодической орбиты из сепаратрисного контура

Для уравнения (1) известен следующий результат [4].

Утверждение 1. Для каждого достаточно малого $\mu > 0$ найдется критическое значение α_*, при котором рождается сепаратрисный контур (рис. 4). Этот контур является односторонне устойчивым, т.е. притягивает все орбиты, с начальными данными внутри области $\mathbb{D}$. При $\alpha > \alpha_*$ контур исчезает и рождается периодическая орбита (рис. 5).

На рис. 6 приведена такая предельная периодическая орбита, полученная с помощью программы WinSet [5] для параметров $\mu = 0.1$ и $\alpha = 10$.

Поскольку теоретические выводы о бифуркации периодических орбит из сепаратрисных контуров носят аналитический характер, далее приводится (таблица 1) результат численного моделирования кривой $\alpha_* = f(\mu)$.

Расчет значений α_* в таблице 1 проводился по следующей схеме [6,7].

1. Система (2) линеаризовалась в седловом состоянии равновесия C_1.
2. Фиксировался параметр μ.
3. Находились собственные векторы $\vec{S}_{1,2}$: векторы $\pm\vec{S}_1$ — касательные к неустойчивым сепаратрисам, векторы $\pm\vec{S}_2$ – касательные к устойчивым сепаратрисам.
4. Из малой μ –окрестности состояния равновесия C_1 в направлении вектора $+\vec{S}_1$ выпускалась сепара-

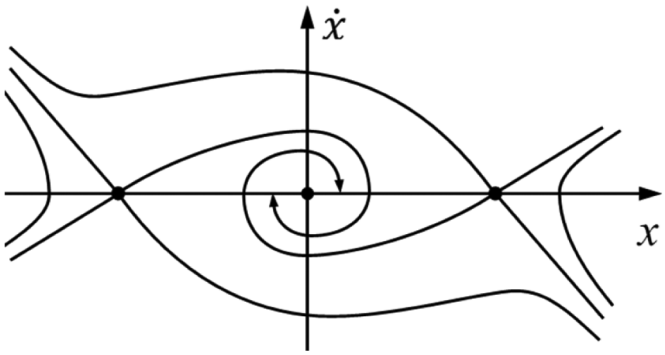


Рис. 2. Устойчивое состояние равновесия $(\mu < 0, \alpha = 0)$

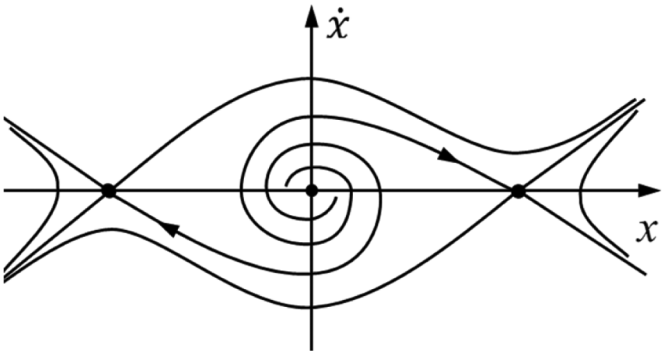


Рис. 3. Неустойчивое состояние равновесия $(2 > \mu > 0, \alpha = 0)$

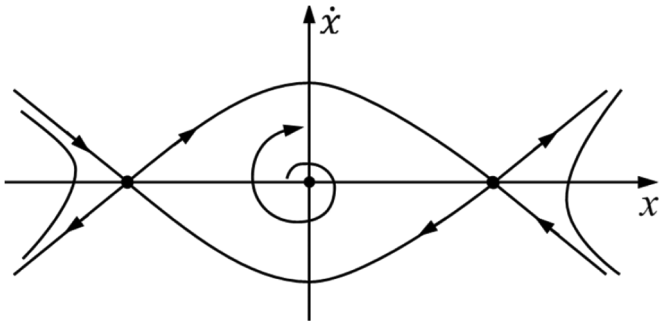


Рис. 4. Односторонне устойчивый сепаратрисный контур

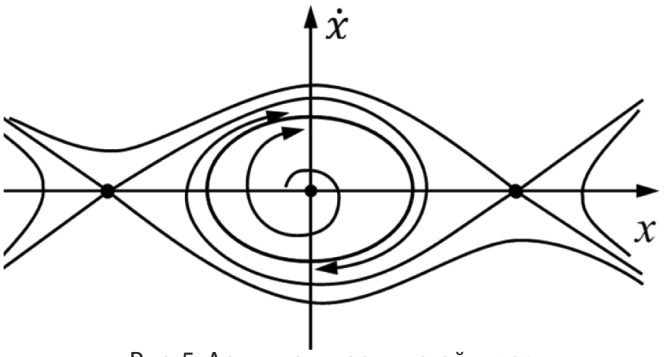


Рис. 5. Асимптотически устойчивая периодическая орбита

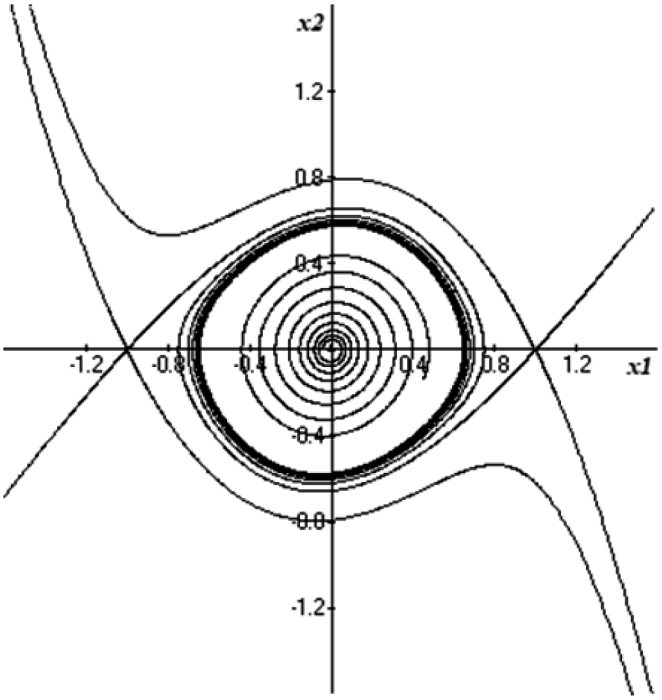
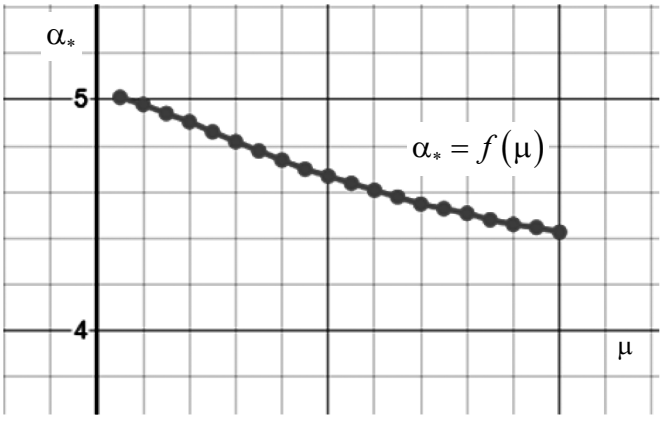


Рис. 6. Устойчивая периодическая орбита

Таблица 1.

μ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
α_*	5.01	4.978	4.940	4.903	4.860	4.818	4.778	4.737	4.698	4.669
μ	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
α_*	4.637	4.607	4.579	4.548	4.528	4.507	4.48	4.46	4.447	4.427



триса. Затем методом пристрелки значение параметра α подбиралось так, чтобы изображающая точка, пробежав по сепаратрисе, попала в μ – окрестность седла C_2.

5. На последнем этапе проводился контроль найденного значения. С этой целью выпускалась орбита $x(t), y(t)$ из произвольной точки $(x_0, y_0) \in \mathbb{D}$. Здесь $\mathbb{D}$ – область охватываемая сепаратрисным контуром. Орбита при этом не должна была покидать область $\mathbb{D}$ при $t \to +\infty$, т.е. контур должен быть E – предельным множеством для орбиты. В этом случае контур называют полуустойчивым. Уточненное значение обозначалось α_*.

На рис. 7 представлен такой полуустойчивый сепаратрисный контур для значений $\mu = 0.8, \alpha_* = 4.736$.

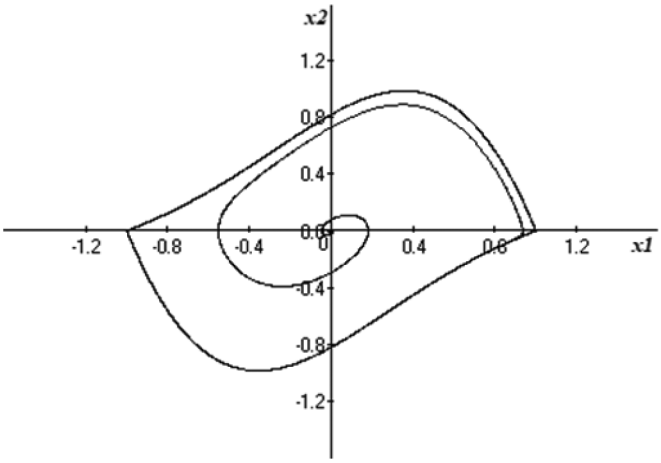


Рис. 7. Асимптотически односторонне устойчивый сепаратрисный контур

Модель B

Рассмотрим модификацию уравнения (1)

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \mu\left(\alpha x^2 - 1\right)\frac{dx}{dt} + x - x^2 = 0. \qquad (4)$$

Здесь, как и выше, μ и α – обозначают положительные параметры.

Запишем (4) в виде системы

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = y, \\ \dfrac{dy}{dt} = -\mu\left(\alpha x^2 - 1\right)y - x + x^2 \end{cases} \qquad (5)$$

и отметим ее свойства.

1. Система (5) имеет состояния равновесия $C_0(0,0)$ и $C_1(1,0)$, причем C_1 – седловое, а C_0, в зависимости от параметров μ, α, может быть центром, фокусом, или узлом.
2. При $\mu = 0$ система (5) интегрируема.
3. Первый интеграл системы (5) $(\mu = 0)$ имеет вид

$$\frac{y^2}{2} + \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} = E = \text{const}. \qquad (6)$$

Семейство инвариантных кривых (6) представлено на рис. 8.1. При этом: а) значению $E = \dfrac{1}{6}$ отвечает петля

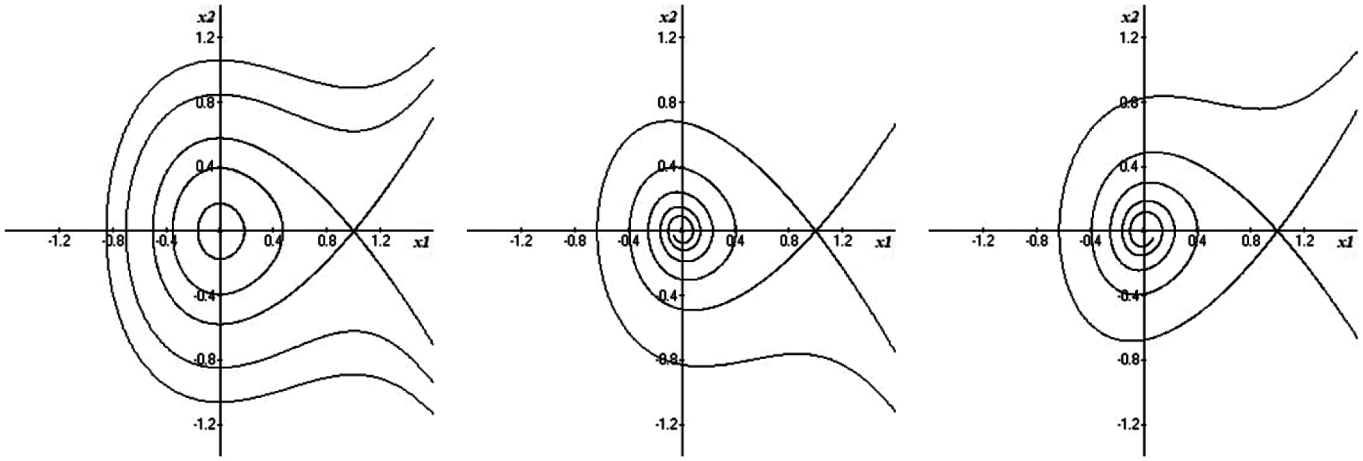


Рис. 8. Орбиты системы (4) при $\alpha = 0$: 1) $\mu = 0$, 2) $\mu = -0.15$, 3) $\mu = 0.15$.

сепаратрисы седла C_1 и две сепаратрисы, исходящие и входящие в седло при $x > 1$, b) значениям $E \in \left(0, \frac{1}{6}\right)$ — семейство замкнутых орбит, окружающих центр C_0, c) значениям $E > \frac{1}{6}$ – семейство незамкнутых кривых, охватывающих петлю сепаратрисы.

4. При $\alpha = 0$ и $\mu < 0$ в силу поворота векторного поля и неравенства

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{y^2}{2} + \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3}\right) = \mu y^2 < 0$$

фазовый портрет претерпит изменения, отмеченные на рис. 8.2, поскольку входящие в первый интеграл инвариантные кривые, как и выше, становятся бесконтактными с направлением поля внутрь. Состояние равновесия C_0 при этом становится устойчивым фокусом при $-2 < \mu < 0$ (рис. 8.3) или узлом ($\mu < -2$).

5. При $\alpha = 0$ и $\mu > 0$ — картина, следующая: C_0 — неустойчивый фокус при $0 < \mu < 2$ (рис. 8.3) или неустойчивый узел при $\mu > 2$.

Напомним, что в полуплоскости $y > 0$ изображающая точка движется слева направо, в полуплоскости $y < 0$ — справа налево.

Рождение периодической орбиты из петли сепаратрисы

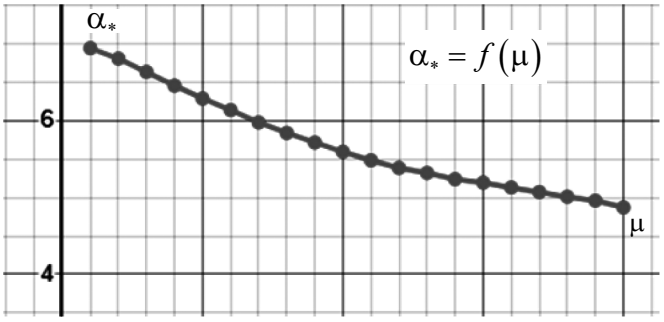
Приводимый далее численный результат (таблица 2) базируется на следующем утверждении [4].

Утверждение 2.

Для каждого малого $\mu > 0$ найдется $\alpha = \alpha_*$ при котором возникает петля сепаратрисы седла C_1, охватывающая область $\mathbb{D}$. Область $\mathbb{D}$ – является бассейном притяжения петли. При $\alpha > \alpha_*$ петля разрушается и появляется устойчивая предельная орбита.

Таблица 2.

μ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
α_*	6.942	6.805	6.633	6.455	6.285	6.136	5.976	5.839	5.715	5.593
μ	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
α_*	5.483	5.384	5.319	5.238	5.193	5.13	5.06	5.01	4.96	4.87



На рис. 9.a (слева) показана полуустойчивая петля сепаратрисы, для параметров $\mu = 0.1, \alpha_* = 6.942$. На рис. 9.b (справа) для $\mu = 0.1, \alpha = 9{,}5$ показана предельная орбита и её бассейн притяжения, границами которого являются устойчивые сепаратрисы.

Методика нахождения параметров α_* аналогична изложенной выше.

Замечание

Приведенные алгоритмы можно использовать для построения бифуркационных кривых и в большем диапазоне изменения параметра μ.

Заключение

Изложенные в статье результаты могут быть интересны специалистам, работающим в электротехнике, радиотехнике, а также теории управления.

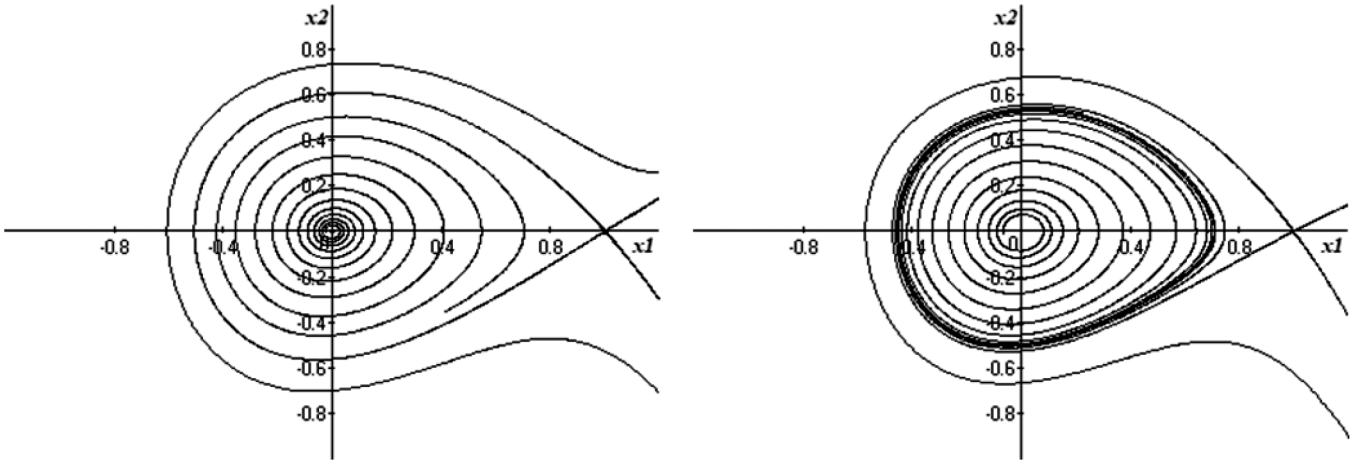


Рис. 9. Бифуркация периодической орбиты

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Рыскин Н.М. Нелинейные колебания. М.: Издательство физико-математической литературы. 2005. 292 с.
2. Морозов А.Д. Математические методы теории колебаний. М. — Ижевск: Институт компьютерных исследований; НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2017. 144 с.
3. Арнольд В.И. Геометрические методы в теории обыкновенных дифференциальных уравнений. — М.: МЦНМО, 2012. — 304 с.
4. Шильников Л.П., Шильников А.Л., Тураев Д.В., Чуа Л. Методы качественной теории в нелинейной динамике. Часть 2. — М. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований. 2009. 548 с.
5. Морозов А.Д., Драгунов Т.Н. Визуализация и анализ инвариантных множеств динамических систем. — М. — Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2003. 304 с.
6. Булекбаев Д.А., Морозов А.В. О построении бифуркационной кривой, отвечающей рождению цикла, в нелинейной системе второго порядка // Перспективы науки. 2023. №8 (167). С.81–84.
7. Морозов А.В. О компьютерном моделировании колебательных систем с одной степенью свободы на фазовой плоскости // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 8. С.147–152.

© Морозов Алексей Валентинович (Alex.morozof@gmail.com); Булекбаев Дастанбек Абдыкалыкович (atiman@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.24

ЦЕЛЕВАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ УТВЕРЖДЕНИЕМ АДМИНИСТРАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

A TO-BE MODEL FOR ADMINISTRATIVE DOCUMENT APPROVAL PROCESS IN AN EDUCATIONAL ORGANIZATION

N. Mysakov
I. Asaliev
O. Romashkova
T. Dobrynina

Summary. The paper presents the results of designing a TO-BE model for an administrative document approval process (memos/requests) in an educational organization. The design is based on AS-IS analysis and identified bottlenecks such as parallel approval channels, lack of unified statuses and return reasons, unclear responsibilities, and deadline risks. The TO-BE model is developed in BPMN using Bizagi Modeler and incorporates standardized input forms, formal routing rules, a unified status registry, SLA and notification mechanisms, audit logging, and information security requirements. A set of target KPIs is proposed to assess the expected impact, including approval lead time reduction, decreased return and overdue rates, and improved observability and traceability of management decisions. The results can serve as a methodological and project basis for implementing practice-oriented information technologies for managing organizational systems in a general education organization.

Keywords: educational organization, management, organizational system, business process, document workflow, management KPIs.

Мысаков Никита Алексеевич
Аспирант, ГАОУ ВО Московский городской педагогический университет
mr.mysakov@mail.ru
Асалиев Ислам Асалиевич
Аспирант, ГАОУ ВО Московский городской педагогический университет
asaliev.isl@mail.ru
Ромашкова Оксана Николаевна
Доктор технических наук, профессор, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, г. Москва
ox-rom@yandex.ru
Добрынина Татьяна Николаевна
Кандидат технических наук, доцент, ГАОУ ВО Московский городской педагогический университет
ermaktat@bk.ru

Аннотация. В статье представлены результаты проектирования целевой модели («как должно быть») процесса согласования и утверждения управленческих документов (служебных записок/заявок) в образовательной организации. Проектирование выполнено на основе результатов анализа процессов «как есть» их недостатков. Модель «как должно быть» разработана с использованием средства моделирования Bizagi Modeler в нотации BPMN и включает стандартизированный вход (шаблон заявки), формализованные правила маршрутизации, единый реестр статусов, механизм SLA/уведомлений, журналирование действий и требования информационной безопасности. Предложен набор целевых показателей (KPI) для оценки эффекта внедрения целевой модели: сокращение времени согласования документов, снижение доли возвратов и просрочек, повышение наблюдаемости и трассируемости управленческих решений. Результаты могут быть использованы как методическая и проектная основа для внедрения практико-ориентированных информационных технологий управления организационными системами в общеобразовательной организации или образовательной организации любого другого уровня.

Ключевые слова: образовательная организация, управление. организационная система, бизнес-процесс, документооборот, управленческие целевые показатели.

Введение

В образовательном учреждении важную роль в управленческой деятельности играет эффективная организация документооборота. С нечеткой организацией движения документов в настоящее время связывают многие недостатки документационного обеспечения деятельности аппарата управления.

Управленческий контур документооборота и согласований в образовательной организации является одним из ключевых механизмов оперативного управления, обеспечивающим принятие и реализацию административных решений [1]. Целевая модель (TO-BE, «как должно быть») рассматривается как проектное описание процесса в улучшенном состоянии, включающее формализацию ролей и уровней ответственности, стан-

дартизацию входных данных, правила маршрутизации, контроль сроков исполнения (SLA), механизмы уведомлений и эскалации, а также требования информационной безопасности и аудита [2].

1. Исходные данные для проектирования целевой модели процесса TO-BE

Проектирование TO-BE модели выполняется на основе результатов AS-IS анализа (таблицы проблем и требований), ключевые из которых: параллельные каналы согласования, отсутствие единого реестра статусов и причин возврата, вариативность маршрутов без правил, отсутствие SLA/уведомлений, недостаточная стандартизация входных данных заявки и слабая трассируемость управленческих решений [3].

Целевая модель ориентирована на реализацию следующих проектных принципов:

- — единый контур процесса (единая среда согласования и фиксации решений);
- — стандартизированный вход (форма заявки с обязательными полями и проверками);
- — маршрутизация по правилам (тип заявки → маршрут согласования);
- — параллельные согласования (при необходимости) со «сборкой» результатов в одной точке;
- — контроль сроков (SLA), уведомления и эскалация при просрочках;
- — журналирование действий и хранение версий документа;
- — разграничение прав доступа и учет требований ИБ/ПДн.

Основной сценарий модели TO-BE процесса представлен на рисунке 1.

2. Модель TO-BE процесса: целевой сценарий и контрольные механизмы

Модель TO-BE процесса согласования и утверждения служебной записки/заявки проектируется как управляемый workflow с едиными правилами маршрутизации, стандартизированным входом, прозрачными статусами и механизмами контроля сроков [4]. В целевом состоянии все действия выполняются в едином контуре, обеспечивающем фиксацию версий документа, журналирование решений и возможность аналитики по времени прохождения и причинам возвратов/отказов.

Основной сценарий TO-BE (утверждение)

Шаг 1. Заполнение стандартизированной формы заявки. Инициатор формирует заявку в цифровой форме, содержащей обязательные поля (тип заявки, цель, обоснование, сроки, требуемые ресурсы, ответственные, перечень приложений). Наличие обязательных полей снижает долю неполных заявок и уменьшает нагрузку на согласующих.

Шаг 2. Автоматическая проверка и классификация. Система выполняет автоматическую проверку полноты данных и прикреплений, а также классифицирует заявку по типу (например: хозяйственная, организационная, ИТ, финансовая, безопасность/ПДн). Результат классификации используется для выбора маршрута согласования.

Шаг 3. Регистрация в едином реестре и первичный статус. Заявке присваивается регистрационный идентификатор, фиксируется дата/время поступления, инициатор и версия документа. Устанавливается первичный статус (например, «Принято»), что обеспечивает наблюдаемость процесса с момента создания заявки.

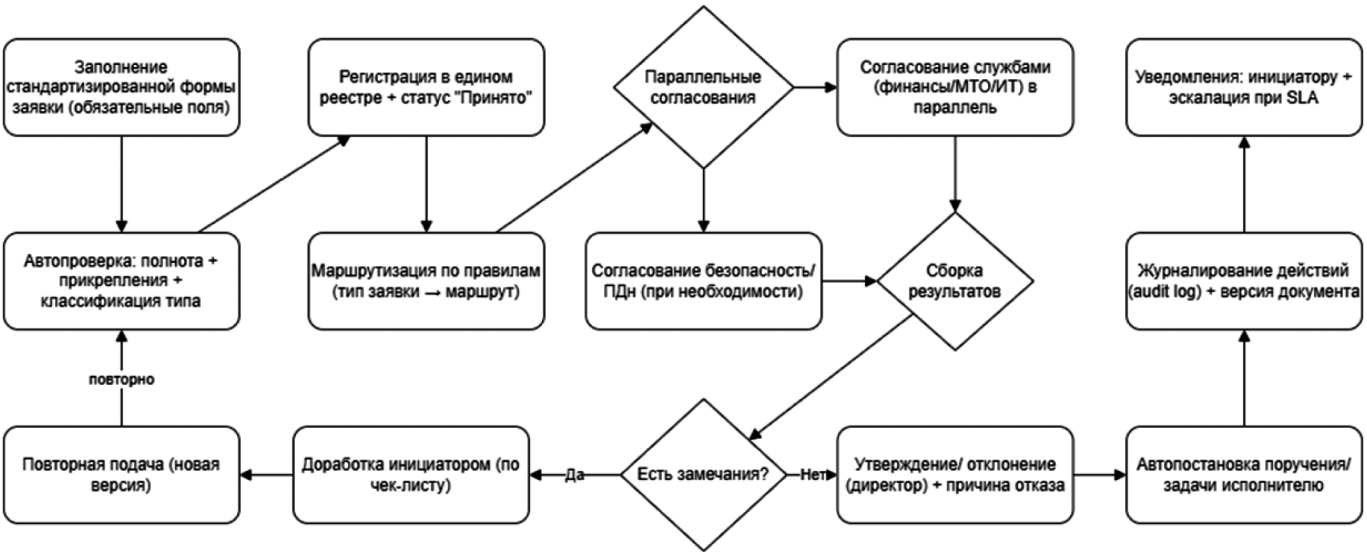


Рис. 1. Модель «как должно быть» процесса согласования и утверждения служебной записки/заявки (BPMN, Bizagi Modeler)

Шаг 4. Маршрутизация по правилам. На основе типа заявки и условий (сроки, требуемые ресурсы, наличие ПДн, финансовые затраты) система определяет маршрут согласования [5]. В отличие от AS–IS, маршрут не задается ситуативно, а соответствует формализованным правилам, что повышает предсказуемость сроков.

Шаг 5. Параллельные согласования (при необходимости). При затрагивании различных ресурсов возможно параллельное согласование несколькими функциональными службами (например: финансы/МТО/ИТ) и ответственными по безопасности/ПДн. Параллельность уменьшает суммарное время прохождения по сравнению с последовательной передачей.

Шаг 6. Сборка результатов и проверка наличия замечаний. После завершения параллельных согласований система консолидирует результаты. Если замечания отсутствуют — заявка автоматически переходит на этап утверждения. Если замечания есть — инициируется управляемый возврат на доработку с обязательной фиксацией причины/класса замечания.

Шаг 7. Утверждение/отклонение директором. Утверждающее лицо принимает решение. В случае отклонения обязательным является указание причины отказа (выбор из классификатора и/или комментарий), что обеспечивает последующую аналитику отказов и управленческую корректировку регламентов.

Шаг 8. Автоматическая постановка поручения и фиксация результата.

При утверждении система формирует поручение/задачу исполнителю (или ответственному подразделению) и фиксирует итог процесса [6]. Одновременно сохраняются: конечный статус, журнал действий, временные метки по этапам и версия документа.

Шаг 9. Уведомление инициатора и завершение процесса. Инициатор получает уведомление о результате (утверждено/отклонено/на доработку), включая формализованную причину и комментарии. Процесс считается завершенным после фиксации результата и доставки уведомления.

Управляемый возврат на доработку (TO-BE)

В TO-BE модели возврат на доработку является формализованной процедурой, что позволяет снизить число итераций и обеспечить аналитическую сопоставимость:

— замечания фиксируются обязательно и относятся к классу/категории (например: «неполные данные», «нехватка обоснования», «ресурсные ограничения», «требования безопасности», «финансовые условия»);
— инициатор получает чек-лист доработки;
— при повторной подаче создается новая версия заявки с сохранением истории изменений;
— система позволяет ограничивать число циклов или инициировать эскалацию при повторяющихся возвратах.

Статусы процесса и контрольные точки

Для обеспечения наблюдаемости и управляемости модели процесса TO-BE целесообразно определить минимально достаточный набор статусов, применимый ко всем заявкам. Пример набора статусов:

— «Черновик» (инициатор готовит заявку);
— «Принято» (зарегистрировано);
— «На проверке» (предварительная проверка/классификация);
— «На согласовании» (в том числе, параллельные ветки);
— «На доработке» (возврат инициатору);
— «На утверждении» (директор);
— «Утверждено» / «Отклонено»;
— «Передано в исполнение» (создано поручение);
— «Завершено» (результат зафиксирован и доведен до инициатора).

Контроль сроков (SLA). В модели TO-BE задаются нормативные сроки по этапам (например: предварительная проверка — до N часов/дней; согласование службами — до M; утверждение — до K). При приближении к дедлайну система отправляет напоминания, а при нарушении — выполняет эскалацию ответственному руководителю [7]. Это позволяет уменьшить «точки ожидания» и повысить дисциплину согласования.

Журналирование и аудит. Каждое действие в процессе фиксируется в журнале: кто выполнил действие, когда, какое принято решение, какая версия документа актуальна. Журналирование обеспечивает восстановление истории решения и поддерживает требования информационной безопасности.

Статусная модель процесса TO-BE и наблюдаемость. Для обеспечения управляемости и сопоставимости прохождения заявок в модели TO-BE вводится единый набор статусов, отражающий жизненный цикл заявки и позволяющий строить аналитику по срокам, возвратам и причинам отказов [8]. Статусы привязываются к контрольным точкам процесса и фиксируются в едином реестре с учетом версий документа и журналирования действий.

На рисунке 2 представлена статусная модель TO-BE процесса, включающая состояния: «Черновик», «Принято», «На проверке/классификации», «На согласовании», «На доработке», «На утверждении», «Утверждено/Отклонено», а также финальные состояния передачи в исполнение и завершения.



Рис. 2. Статусная модель TO-BE процесса согласования и утверждения служебной записки/заявки

3. Целевые показатели результативности (KPI) модели TO-BE

Для оценки эффекта внедрения модели TO-BE предлагается использовать набор KPI, отражающий скорость прохождения документов, качество согласования и дисциплину соблюдения сроков, а также степень наблюдаемости и управленческой трассируемости процесса [9]. Показатели целесообразно измерять в режиме «до/после» внедрения (AS-IS vs TO-BE) и использовать для корректировки регламентов и маршрутов согласования (таблица 1).

4. Подход к оценке эффекта внедрения (AS-IS vs TO-BE)

Для практико-ориентированной апробации TO-BE модели рекомендуется:

1) задать период измерения «до» (например, 1–2 месяца по AS-IS) и «после» (после запуска пилота);
2) фиксировать KPI на уровне заявок и этапов (по статусам) в едином реестре;
3) сравнивать медианные значения Lead Time и долю возвратов/просрочек;
4) анализировать причины возвратов и отказов (по классификатору) и корректировать правила маршрутизации и шаблон заявки.

5. Сравнительный анализ моделей процесса AS-IS и TO-BE

Сравнение текущего состояния процесса (AS-IS) и целевой модели (TO-BE) позволяет обосновать проектные решения и показать ожидаемый управленческий эффект. В AS-IS модели ключевые потери эффективности связаны с фрагментарной фиксацией статусов, смешанным документооборотом, вариативностью маршрута согласования без правил и отсутствием механизмов контроля сроков [10]. TO-BE модель устраняет указанные ограничения за счет внедрения единого контура прохождения документа, стандартизированного входа, маршрутизации по правилам, параллельных согласований, SLA/уведомлений и audit log.

Ниже представлена сводная таблица 2 «AS-IS» → «TO-BE», отражающая изменения по основным аспектам процесса.

6. Ожидаемые изменения по KPI

Переход к TO-BE модели должен приводить к измеримым изменениям по KPI:

- снижение Lead Time согласования за счет параллельных согласований и устранения «точек ожидания»;
- снижение доли возвратов благодаря стандартизации входа и автопроверкам;
- снижение доли просрочек SLA за счет напоминаний и эскалации;
- рост трассируемости решений благодаря единому реестру, статусной модели и audit log.

Заключение

В статье выполнено проектирование целевой модели процесса согласования и утверждения служебной

Таблица 1.

Показатели KPI процесса «как должно быть» и способы расчета

KPI	Смысл показателя	Как считать (кратко)	Целевой эффект
lead time согласования	сколько времени заявка проходит от регистрации до результата	T(результат) − T(принято)	снижение общего времени
время этапов (stage time)	где именно «зависает» процесс	по каждому статусу: T(выход) − T(вход)	выявление узких мест
доля возвратов на доработку	качество входа и согласования	кол-во возвратов / кол-во заявок	снижение возвратов
среднее число итераций	сколько циклов доработки на заявку	сумма циклов / кол-во заявок	меньше повторов
доля просрочек sla	дисциплина сроков	просроченные этапы / все этапы	снижение просрочек
частота эскалаций	насколько часто «ломается» SLA	эскалации / заявки	снижение эскалаций
доля отказов (и причины)	управленческие решения и ограничения	отказы / заявки + топ причин	управленческая аналитика
нагрузка по ролям	распределение работы	кол-во согласований по роли	баланс нагрузки
полнота данных заявки	качество формы и автопроверок	доля заявок без ручных замечаний на полноту	рост качества входа
трассируемость решений	есть ли полный цифровой след	доля заявок с полным audit log и версиями	рост наблюдаемости

Таблица 2.

Сравнение AS-IS и TO-BE моделей процесса согласования управленческих документов

Аспект	AS-IS (текущее состояние)	TO-BE (целевое состояние)	Ожидаемый эффект
Каналы согласования	смешанные (бумага/почта/мессенджеры), возможны обходные решения	единый контур, единая версия документа	снижение потерь информации, трассируемость
Входные данные заявки	произвольная форма, неодинаковая полнота	стандартизированная форма + обязательные поля + автопроверка	меньше возвратов, выше качество входа
Маршрут согласования	определяется ситуативно, «по необходимости» без правил	маршрутизация по правилам (тип/условия ⟶ маршрут)	предсказуемость сроков, исключение лишних этапов
Согласования службами	часто последовательные или не фиксируемые	параллельные согласования + «сборка» результатов	сокращение суммарного времени
Статусы процесса	Не унифицированы/ фиксируются частично	единый набор статусов, статусная модель	наблюдаемость и контроль очереди
Возврат на доработку	замечания свободной формы, нет классификатора	классификатор причин + чек-лист доработки + версия документа	снижение итераций, аналитика причин
Контроль сроков	отсутствует или ручной, «точки ожидания»	SLA по этапам + напоминания + эскалация	снижение просрочек, дисциплина процесса
Ответственность	размыта, сложно установить источник задержки	закрепление ответственности по этапам, владелец процесса	прозрачность и управляемость
Фиксация решений	частично, нет единого журнала	audit log: кто/когда/что решил + версии	разбор спорных случаев, управленческий учет
Причины отказа	не фиксируются или фиксируются не структурно	обязательная причина отказа (классификатор + комментарий)	аналитика отказов и корректировка регламентов
ИБ/ПДн	риски из-за неконтролируемых каналов	разграничение прав + хранение в контуре + контроль доступа	снижение рисков, соответствие требованиям

записки/заявки в образовательной организации с использованием BPMN-моделирования (Bizagi Modeler). Целевая модель сформирована на основе результатов анализа процессов «как есть» и ориентирована на устранение ключевых потерь эффективности: параллельных неуправляемых каналов согласования, недостаточной наблюдаемости статусов, вариативности маршрутов без правил, отсутствия SLA и механизмов контроля, а также низкой трассируемости управленческих решений.

Предложенное целевое решение включает стандартизированную форму заявки с автопроверкой, маршрутизацию по правилам, параллельные согласования функциональными службами с консолидацией результатов, формализованный возврат на доработку с классификатором причин и версиями документа, а также механизмы журналирования действий, уведомлений и эскалации. Для оценки эффекта внедрения определён набор KPI (Lead Time, доля возвратов, доля просрочек SLA, частота эскалаций, аналитика причин отказов и др.), позволяющий выполнять сравнение «до/после» и корректировать регламент и правила маршрутизации на основе данных.

Результаты могут быть использованы как проектная основа для внедрения практико-ориентированных информационных технологий управления организационными системами в образовательной организации и как методическая база для разработки регламентов цифровой поддержки управленческого документооборота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Захаров Я.В., Ромашкова О.Н. Анализ информационных потоков в образовательной организации в целях соответствия современным вызовам в образовании // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: естественные и технические науки — Москва 2025–№1 — С. 74–79
2. Каптерев А.И., Ромашкова О.Н., Чискидов С.В., Ермакова Т.Н. Современное состояние и перспективы моделирования цифровых профессиональных пространств в бизнесе и образовании. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования. Том 20, № 4 (2023) С.358–372.
3. Ломовцев Р.С., Ромашкова О.Н., Пономарева Л.А. Алгоритм интеллектуальной поддержки управленческих решений для региональной образовательной системы // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 10 (71). С. 35–43.
4. Павличева Е.Н., Ромашкова О.Н. Информационные процессы поддержки принятия решений в многоуровневых образовательных системах /Москва, 2022.
5. 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.
6. Ромашкова О.Н., Ермакова Т.Н. Повышение эффективности управления информационными потоками в образовательном комплексе // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 57. С. 82–87.
7. Ponomareva L.A., Romashkova O.N. Training of specialists in on-board communication systems. // В сборнике: 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications. 2020. С. 9078594.
8. Попов Е.П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах. М: Наука. 2021. 584 с.
9. Юсупова Н.И., Сметанина О.Н., Агадуллина А.И., Рассадникова Е.Ю. // Вопросы моделирования при организации информационной интеллектуальной поддержки управленческих решений в сложных системах. Фундаментальные исследования. 2017. № 2. С. 107–113.
10. Рябовичева О.В., Ромашкова О.Н., Ермакова Т.Н., Чискидов С.В. Процесс обработки и передачи виртуальных данных в вычислительных комплексах и компьютерных сетях вуза //Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 7–2. С. 85–92.

© Мысаков Никита Алексеевич (mr.mysakov@mail.ru); Асалиев Ислам Асалиевич (asaliev.isl@mail.ru);
Ромашкова Оксана Николаевна (ox-rom@yandex.ru); Добрынина Татьяна Николаевна (ermaktat@bk.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.26

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КРИТИЧНОСТИ УЯЗВИМОСТЕЙ ФСТЭК РОССИИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В ГОСУДАРСТВЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

APPLICATION OF THE RUSSIAN FEDERATION'S FSTEC VULNERABILITY CRITICALITY ASSESSMENT METHOD TO ANALYZE THE EFFECTIVENESS OF INFORMATION SECURITY SYSTEMS IN GOVERNMENT INFORMATION SYSTEMS

E. Novikov
V. Afanasyev
N. Kunin

Summary. This article examines approaches to applying the new methodology of the Federal Service for Technical and Export Control of Russia (FSTEC) dated June 30, 2025 [1]. An analysis of the transition from a formal vulnerability assessment to a context-sensitive model is provided. An algorithm for using this methodology to quantitatively evaluate the effectiveness of implemented information security tools (ISS) is proposed, using government information systems (GIS) as an example, where information availability is a key parameter [10].

Keywords: analysis, evaluation methodology, effectiveness, information security systems, government information systems.

Новиков Евгений Иванович
кандидат технических наук, доцент,
МИРЭА — Российский технологический университет
novikov_ei@mirea.ru
Афанасьев Вадим Владимирович
кандидат технических наук, доцент,
МИРЭА — Российский технологический университет
afanasev_v@mirea.ru
Кунин Никита Тимофеевич
старший преподаватель,
МИРЭА — Российский технологический университет
kunin@mirea.ru

Аннотация. В статье рассматриваются подходы к применению новой методики ФСТЭК России от 30 июня 2025 года [1]. Проведен анализ перехода от формальной оценки уязвимости к контекстно-зависимой модели. Предложен алгоритм использования данной методики для количественной оценки эффективности внедренных средств защиты информации (СЗИ) на примере государственных информационных систем (ГИС), где ключевым параметром является доступность информации [10].

Ключевые слова: анализ, методика оценки, эффективность, системы защиты информации, государственные информационные системы.

Методика ФСТЭК России от 30 июня 2025 года представляет собой существенный шаг вперед по сравнению с чисто формальным подходом к управлению уязвимостями (например, основанным только на CVSS) [6, 7, 8, 12]. Она вводит контекстно-зависимую оценку, что критически важно для реальной безопасности.

Методика предлагает формулу расчета уровня критичности уязвимости (V), которая учитывает не только техническую сложность уязвимости, но и контекст инфраструктуры и актуальность угрозы:

$$V = I_{cvss} \times I_{infr} \times \left(I_{at} + I_{imp}\right),$$

где:

— I_{cvss} — базовая оценка по CVSS 3.1 (техническая опасность) [6];
— I_{infr} — влияние инфраструктуры (тип компонента, количество, доступность из Интернета);
— I_{at} — актуальность угрозы (наличие эксплойта);
— I_{imp} — тяжесть последствий (потеря целостности, выполнение произвольного кода и т.д.).

На выходе получается балл, определяющий жесткие сроки устранения: от 24 часов (Критический) до 4 месяцев (Низкий).

К положительным сторонам данной методики можно отнести:

1. Методика уходит от простой установки патчей «на всё подряд» к риск–ориентированному подходу. Это заставляет учитывать бизнес–значимость компонентов информационной системы.
2. Учет реальности угрозы (I_{at}) — пожалуй, самый сильный аспект. Если эксплойта нет, множитель I_{at}

равен 0,1, что резко снижает итоговый балл. Если есть эксплойт — 0,3, если зафиксирован факт его применения в реальной атаке — 0,6. Это позволяет не паниковать из-за теоретических уязвимостей с высоким CVSS.

3. Методика разделяет типы воздействий и их последствий (I_{imp}). Выполнение произвольного кода ($H = 0,5$) оценивается опаснее, чем XSS ($H = 0,1$), что технически обосновано.
4. Документ устанавливает конкретные сроки для устранения уязвимостей в зависимости от уровня, что дает ИБ–специалистам аргументы для бизнеса и ИТ–департамента.

К недостаткам методики можно отнести:

1. Чувствительность к качеству анализа киберугроз. Показатель I_{at} (наличие атак/эксплойтов) требует постоянного мониторинга БДУ ФСТЭК или иных баз [4]. Если данные об атаках поступят с задержкой, организация может ошибочно классифицировать критическую уязвимость как «среднюю».
2. Статичность весовых коэффициентов. Например, утечка конфиденциальной информации имеет вес 0,3, а нарушение целостности — 0,3. Для некоторых организаций (например, банков) утечка может быть критичнее нарушения целостности вспомогательной системы, но методика уравнивает эти риски.
3. Для каждой уязвимости нужно определить тип компонента, его количество и доступность [13]. Без автоматизации процесс для крупной инфраструктуры станет неподъемным.

Хотя методика предназначена для оценки уязвимостей, ее логику можно применить для оценки эффективности внедренных средств защиты информации (далее СЗИ).

Показатель эффективности защиты коррелирует с уровнем критичности уязвимостей [9, 11]. Высокая критичность неизбежно требует мобилизации больших ресурсов (как денежных, так и временных) для нейтрализации угрозы или минимизации ущерба. Важно также помнить, что массовое наличие критических уязвимостей кумулятивно снижает защищенность всей информационной системы.

Будем считать, что повышение эффективности СЗИ можно оценить через их способность снижать численные показатели формулы критичности уязвимости, переводя ее из статуса «Критический» в «Средний» или «Низкий».

Исходя из вышеописанного, попытаемся адаптировать методику ФСТЭК под такой класс информационных систем, как государственные информационные системы (далее ГИС). Предназначение ГИС заключается в инфраструктурной поддержке деятельности органов власти, организации межведомственного обмена данными и обеспечении прозрачности социально значимых процессов (например, выборов или реализации национальных проектов) для граждан [2]. Ключевым требованием к функционированию ГИС является предоставление пользователям данных, гарантирующее их полноту, оперативность и достоверность [3].

Для подобного класса систем подберём соответствующие общие значения показателей формулы расчета критичности уязвимостей. Основной упор сделаем на уязвимости, эксплуатируемые для реализации угроз доступности информации, что обусловлено функциональным назначением ГИС [10].

I_{at} — показатель, характеризующий возможность эксплуатации уязвимости. Примем его равным 0,6. Это указывает на то, что оцениваемая потенциальная уязвимость применяется в реальных атаках.

I_{imp} — показатель, характеризующий последствия эксплуатации уязвимости. Когда злоумышленник (или программный сбой) эксплуатирует уязвимость, направленную на доступность, ГИС перестает выполнять свою главную функцию — предоставлять сервис вовремя и в полном объеме.

Приведем список преднамеренных киберугрозы (по отношению к доступности) [4, 5]:

— DoS/DDoS–атаки. Перегрузка каналов связи или ресурсов серверов огромным количеством ложных запросов.
— Вредоносное ПО (шифровальщики/вайперы). Блокировка доступа к данным путем их шифрования или полное удаление информации.
— Взлом системы с целью остановки критических процессов.

Возможные последствия (по отношению к доступности):

— Полный отказ в обслуживании. Система перестает отвечать на любые запросы. Это может быть следствием «падения» службы, критической ошибки ядра или переполнения очереди запросов.
— Деградация производительности. Система работает, но крайне медленно. Время ответа увеличивается с миллисекунд до десятков секунд или минут, что делает использование ИС фактически невозможным.
— Исчерпание ресурсов. Эксплуатация уязвимости (например, утечки памяти или бесконечные циклы) приводит к тому, что процессор загружен на 100 %, оперативная память заполнена, а дисковое пространство забито временными файлами или логами.

— Каскадный сбой. Отказ одного компонента (например, базы данных) вызывает «эффект домино». Другие связанные системы (веб-интерфейс, мобильные приложения, системы межведомственного взаимодействия) также выходят из строя, пытаясь достучаться до упавшего узла.

В отношении показателей I_{infr}, I_{at} и I_{imp} действует принцип максимизации оценки. В случаях, когда контекст анализа допускает использование нескольких значений для одного показателя, в качестве итогового результата необходимо выбирать наибольшее из них. Поэтому, I_{imp} принимаем равным 0,3. Данное значение учитывает такие числовые показатели последствий воздействий, как: отказ в обслуживании (0,26, киберугроза — DoS/DDoS–атаки) и нарушение целостности данных (0,3, киберугроза — Вредоносное ПО (шифровальщики/вайперы)).

Таким образом:

$$V = I_{cvss} \times I_{infr} \times (0,6 + 0,3)$$

$$V = I_{cvss} \times I_{infr} \times 0,9$$

I_{infr} — показатель, характеризующий влияние уязвимости на функционирование информационных систем.

I_{infr} определяется по следующей формуле:

$$I_{infr} = k \times K + l \times L + p \times P$$

где:

— k, l, p — статичные весовые коэффициенты;

— K, L, P — значения показателей.

K — показатель, характеризующий тип компонента информационной системы, подверженного уязвимости. Для наглядности распределим угрозы по уровням информационной системы.

Поскольку рассмотренные угрозы нацелены на нарушение доступности, а непрерывный доступ к данным является приоритетной функцией ГИС, классификация уязвимых компонентов должна отражать эту критичность. Исходя из этого следует, что по типу компонента ИС стоит выбрать пункт «Уязвимости подвержены компоненты системы, обеспечивающие реализацию важных процессов (бизнес–процессов), функций, полномочий». Этому выбору соответствуют значения коэффициентов: $K = 1,1$, а произведение $k \times K = 0,55$.

L — показатель, характеризующий количество уязвимых компонентов информационной системы. В контексте уязвимостей, влияющих на доступность информации в ИС значение тяжело «спрогнозировать». Показатель сильно связан с архитектурой конкретной ГИС. Поэтому примем $L = x$, где $x : \{0,1; 0,12; 0,16; 0,2\}$.

Таблица 1.

Распределение угроз по уровням ИС

Типичные методы воздействия на доступность	На что направлена угроза?	Компонент ИС
DDoS (L3/L4), физическое повреждение кабелей, перехват сессий.	Каналы связи, маршрутизаторы, коммутаторы.	Сетевая инфраструктура
Перегрев, перепады напряжения, износ дисков.	Серверы, процессоры, оперативная память, СХД	Аппаратная часть
Эксплуатация 0–day уязвимостей, переполнение буфера.	Операционные системы, СУБД, веб-серверы	Программный уровень
Шифрование (Ransomware), удаление, порча индексов БД.	Базы данных, конфигурационные файлы, бэкапы	Данные
Блокировка доступа администраторов, фишинг.	АРМ (рабочие места) сотрудников, учетные записи	Пользовательский уровень

P — показатель, характеризующий влияние уязвимого компонента на защищенность периметра информационной системы или периметра сегмента информационной системы (в случае сегментирования информационной системы), или, иными словами, наличие удаленной доступности до уязвимого элемента ИС. Для информационных систем типа ГИС разумнее всего считать данное значение равным 0,33 (цель ГИС — непрерывная работы; угрозы доступности — DDoS, внешний нарушитель; $P = 1,1$, а $p \times P = 0,33$).

Таким образом:

$$V = I_{cvss} \times (0,55 + x + 0,33) \times (0,6 + 0,3)$$

$$V = I_{cvss} \times (0,88 + x) \times 0,9$$

С учетом того, что $L = x$:

— Для $x = 0,1$ (10 % компонентов от общего числа компонентов в информационной системе подвержено исследуемой угрозе)

$$V = I_{cvss} \times 0,882$$

— Для $x = 0,12$ (10 %–50 % компонентов от общего числа компонентов в информационной системе подвержено исследуемой угрозе)

$$V = I_{cvss} \times 0,9$$

— Для $x = 0,16$ (50 %–70 % компонентов от общего числа компонентов в информационной системе подвержено исследуемой угрозе)

$$V = I_{cvss} \times 0,936$$

— Для $x = 0,2$ (более 70 % компонентов от общего числа компонентов в информационной системе подвержено исследуемой угрозе)

$$V = I_{cvss} \times 0,972$$

Таким образом, для компонентов ГИС, доступных из сети интернет, обеспечивающих реализацию важных процессов ИС основным показателем, характеризующим критичность уязвимости (используемой в реальных атаках) связанной с угрозой доступности, будет являться I_{cvss}. Не зная точных данных об архитектуре, моделируемой ИС, но имея набор всех возможных значений параметра L, можно предположить, что для уязвимостей в ГИС, связанных с угрозами доступности

$$V \approx I_{cvss} \times 0,92,$$

где, 0,92 взято как среднеарифметическое значение от $(0,882;0,9;0,936;0,972)$ Для $I_{cvss} > 5,43$ показатель V принимает значения ВЫСОКОЕ (от 5 до 8) и КРИТИЧЕСКОЕ (больше 8).

Стоит отметить, критичность показателя I_{at}. Если предположить, что показатель I_{at} равен 0,3 (имеются сведения о наличии средств эксплуатации (эксплойта) уязвимости), то

$$V = I_{cvss} \times I_{infr} \times 0,6$$

$$V = I_{cvss} \times (0,88 + x) \times 0,6$$

— Для $x = 0,1$

$$V = I_{cvss} \times 0,558$$

— Для $x = 0,12$

$$V = I_{cvss} \times 0,6$$

— Для $x = 0,16$

$$V = I_{cvss} \times 0,624$$

— Для $x = 0,2$

$$V = I_{cvss} \times 0,648$$

$$V \approx I_{cvss} \times 0,61,$$

где, 0,61 взято как среднеарифметическое значение от $(0,558;0,6;0,624;0,648)$.

При таком значении I_{at} для $I_{cvss} > 8,1$ показатель V принимает значения ВЫСОКОЕ (от 5 до 8). При $I_{at} = 0,3$ для уязвимостей с $Icvss > 3,27$ показатель V принимает значение СРЕДНЕЕ (от 2 до 5). В реальных условиях функционирования ГИС показатель критичности уязвимости связанной с угрозой доступности выше НИЗКОГО неприемлем.

Самое большое влияние на уровень критичности уязвимости оказывает показатель I_{at}. Он зависит от качества анализа киберугроз и принимает значения $I_{at}\{0,6;0,3;0,1\}$. Вводимые средства защиты информации в ИС будут влиять на показатели I_{infr} и I_{imp}. В контексте применения методики для расчета эффективности СЗИ системы можно рассмотреть следующие сценарии:

1. Оценка эффективности межсетевых экранов и сегментации (параметр P). Методика вводит параметр P (доступность из Интернета):
— Без СЗИ сервер доступен напрямую ($P = 1,1$).
— С СЗИ (например NGFW/VPN), если оно настроено так, что уязвимый компонент скрыт за VPN или доступ к уязвимому порту заблокирован извне, параметр P меняется на 0,6 (недоступно из сети «Интернет»).
— Эффективность СЗИ в данном контексте измеряется снижением итогового балла V почти в 2 раза (1,1 против 0,6). Если внедрение NGFW позволяет перевести критические уязвимости в разряд «высоких» или «средних», инвестиция оправдана.
2. Оценка систем управления конфигурациями и доступом (параметры K и H)
— Параметр K (тип компонента): если с помощью СЗИ (например, PAM–системы или VDI) вы изолируете критические бизнес–процессы от уязвимых пользовательских АРМ, вы гарантируете, что уязвимость на АРМ ($K = 0,25$) не влияет на критический процесс ($K = 0,55$).
— Параметр H (последствия): если используется «песочница» или система контроля запуска приложений (AppLocker), которая блокирует «Выполнение произвольного кода» ($H = 0,5$), снижая последствия до простого «Отказа в обслуживании» ($H = 0,26$), это также демонстрирует эффективность СЗИ в снижении итогового риска.

На основе данных о назначении и классе защищенности ИС производится оценка показателя эффективности применяемых мер безопасности. Базовый показатель состояния системы (ρ) определяется выражением:

$$\rho = I_{infr} \times (I_{at} + I_{imp})$$

Итоговая эффективность внедрения средств защиты (Δ) рассчитывается как разность показателей системы в конечном (t_2) и начальном (t_1) состояниях:

$$\Delta = \rho(t_1) - \rho(t_2)$$

где t_1 — период до модернизации СЗИ, а t_2 — после.

Пример расчета: В момент t_1 состояние системы ρ принимает значение 0,8. В момент t_2, что соответствует введению в работу системы средств защиты информации, состояние системы ρ принимает значение 0,3. Итоговая эффективность будет равна:

$$\Delta = 0,8 - 0,3 = 0,5.$$

Анализ показывает, что методика ФТСЭК России является гибким инструментом, сочетающим качественную оценку рисков с строгим математическим аппаратом. Несмотря на сложность внедрения, для критически важных систем, таких как ГИС, она позволяет обоснованно управлять приоритетами безопасности. Переход к данной методике трансформирует процесс обеспечения безопасности из реактивного «латания дыр» в стратегическое управление рисками. Главная ценность — возможность математически доказуемого снижения класса критичности уязвимостей в зависимости от применяемых к информационной системе средств защиты (межсетевых экранов, песочниц, систем разграничения доступа). Это позволяет легитимно увеличивать регламентные сроки на устранение уязвимостей (например, переводя их из 24-часового режима в плановый), снижая нагрузку на ИТ-персонал и предотвращать остановку критических бизнес–процессов государственных информационных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. ФСТЭК России. Методика оценки уровня критичности уязвимостей программного обеспечения и программно-аппаратных средств. — Утверждена ФСТЭК России 30 июня 2025 г. — М., 2025.
2. Федеральный закон от 27.07.2006 № 149–ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации».
3. Приказ ФСТЭК России от 11.02.2013 № 17 «Об утверждении Требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах».
4. Банк данных угроз безопасности информации (БДУ ФСТЭК России). — URL: [https://bdu.fstec.ru/] (https://bdu.fstec.ru/) (дата обращения: 16.02.2026).
5. ГОСТ Р 56546–2015. Защита информации. Уязвимости информационных систем. Классификация уязвимостей информационных систем. — М.: Стандартинформ, 2015.
6. Common Vulnerability Scoring System v3.1: Specification Document. — FIRST.Org, Inc. — URL: (https://www.first.org/cvss/v3.1/specification–document).
7. Марков А.С., Цирлов В.Л. Опыт и проблемы оценки серьезности уязвимостей программного кода // Вопросы кибербезопасности. — 2021. — № 2(42). — С. 48–57.
8. Баранов А.П., Бочков М.В. Методика адаптивной оценки критичности уязвимостей в автоматизированных системах управления // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2022. — № 3. — С. 15–23.
9. Костров Д.В., Смирнов А.А. Оценка эффективности систем защиты информации в государственных информационных системах на основе риск–ориентированного подхода // Информация и безопасность. — 2023. — Т. 26, № 2. — С. 189–198.
10. Григина И.В., Попов А.Д. Моделирование угроз доступности информации в облачных сегментах государственных информационных систем // Безопасность информационных технологий. — 2022. — Т. 29, № 1. — С. 65–76.
11. Астеров Д.В. Подходы к количественной оценке эффективности мер по обеспечению безопасности значимых объектов КИИ // Защита информации. Инсайд. — 2021. — № 4(100). — С. 34–39.
12. Лукацкий А.В. Риск–ориентированное управление уязвимостями: от CVSS к реальным приоритетам // Вопросы защиты информации. — 2020. — № 4. — С. 12–18.
13. Саматов К.М. Проблемы реализации требований ФСТЭК России по контролю уязвимостей в крупных инфраструктурах // Information Security / Информационная безопасность. — 2023. — № 5. — С. 22–25.

© Новиков Евгений Иванович (novikov_ei@mirea.ru); Афанасьев Вадим Владимирович (afanasev_v@mirea.ru);
Кунин Никита Тимофеевич (kunin@mirea.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.27

ФОРМИРОВАНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ DDOS-АТАК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

GENERATION OF SYNTHETIC DATA FOR DETECTION OF DDOS ATTACKS USING MACHINE LEARNING

E. Novikov
V. Afanasyev
N. Kunin

Summary. The constant increase in the number of distributed denials of service (DDoS) attacks necessitates the improvement of detection approaches. This paper examines the possibility of using machine learning methods to improve the accuracy of DDoS attack detection. It is noted that the most important step in developing DDoS attack detection models is the creation of a training dataset. A technology for generating training data for models using virtual machines and specialized tools for generating and analyzing network traffic is proposed.

Keywords: cybersecurity, intrusion detection system, DDoS attacks, machine learning, synthetic data, network traffic.

Новиков Евгений Иванович
кандидат технических наук, доцент,
МИРЭА — Российский технологический университет
novikov_ei@mirea.ru
Афанасьев Вадим Владимирович
кандидат технических наук, доцент,
МИРЭА — Российский технологический университет
afanasev_v@mirea.ru
Кунин Никита Тимофеевич
старший преподаватель,
МИРЭА — Российский технологический университет
kunin@mirea.ru

Аннотация. Постоянное увеличение количества атак типа «отказ в обслуживании» (Distributed Denial of Service, DDoS) обуславливает совершенствование походов к их обнаружению. В работе рассматривается возможность использования методов машинного обучения для повышения точности обнаружения DDoS-атак. Отмечается, что наиболее важным этапом разработки моделей обнаружения DDoS-атак является создание обучающего набора данных. Предложена технология формирования данных для обучения моделей с использованием виртуальных машин и специализированных инструментов для генерации и анализа сетевого трафика.

Ключевые слова: кибербезопасность, система обнаружения вторжений, DDoS-атаки, машинное обучение, синтетические данные, сетевой трафик.

С развитием информационных технологий и увеличением количества сетевых устройств проблема кибербезопасности становится все более актуальной. Одной из наиболее распространенных и опасных угроз являются распределенные атаки типа «отказ в обслуживании» (Distributed Denial of Service, DDoS), которые могут привести к значительным финансовым и репутационным потерям.

Количество DDoS-атак ежегодно увеличивается. В 2024 году эксперты ГК «Солар» зафиксировали 508 тысяч DDoS-атак на российские организации, что почти в два раза больше аналогичного показателя 2023 года [1]. Неутешительные прогнозы предоставляет и компания StormWall. По ее данным количество DDoS-атак в 2024 году в мире выросло на 108 % по сравнению с 2023 годом [2]. По разным оценкам, только за 2024 год, DDoS-атаки нанесли $8–12 млрд совокупного ущерба различным компаниям, а средний ущерб для бизнеса — $150–300 тыс. за одну атаку.

Ключевым фактором роста DDoS-атак стало расширение ботнет-сетей (botnet). Так к IV кварталу 2024 года этот показатель вырос до 38000. При этом распределение носит крайне неравномерный характер: наряду с компактными ботнетами (несколько тысяч узлов) существуют масштабные сети, контролирующие миллионы зараженных устройств.

Существенный рост частоты DDoS-атак в последние годы, актуализирует задачу разработки более эффективных механизмов обеспечения кибербезопасности. Организации должны инвестировать в современные технологии, а также внедрять различные стратегии защиты, например, такие как система обнаружения вторжений.

Традиционные системы обнаружения вторжений (Intrusion Detection Systems, IDS) представляют собой специализированные программно-аппаратные решения, предназначенные для выявления несанкционированного доступа к компьютерным системам через интернет. Несмотря на их ключевую роль в кибербезо-

пасности, эффективность IDS ограничена: они не всегда способны обнаруживать новые и сложные угрозы, часто дают ложные срабатывания и требуют значительных вычислительных ресурсов для работы. Эти ограничения связаны с используемыми методами анализа, которые не всегда адекватно определяют современные виды атак [3].

Архитектура IDS состоит из трех основных элементов: сбор данных, анализ и реагирование [4].

Сбор данных является наиболее важным этапом работы системы обнаружения вторжений. От качества и полноты собранных данных зависит эффективность последующего анализа и реагирования. В контексте DDoS-атак данными, необходимыми для обнаружения, будут являться характеристика сетевого трафика. К таким характеристикам относятся атрибуты сетевых пакетов, такие как структура и содержимое заголовков различных уровней сетевой модели, временные характеристики передачи, размеры и частота поступления пакетов, интенсивность трафика, объем переданных данных, длительность сессии, время между запросами и др.

Анализатор выполняет обработку поступающих данных с целью выявления потенциально опасной активности. Его основная функция состоит в выделении среди всего множества наблюдаемых сетевых событий тех, которые демонстрируют характеристики, позволяющие отнести их к проявлениям злонамеренных или нетипичных действий.

Модуль реагирования в IDS реализует механизмы обработки выявленных угроз безопасности. При обнаружении потенциальной угрозы менеджер реагирования собирает и анализирует данные о тревожных событиях, поступающие от сенсорных компонентов системы, после чего передает соответствующую информацию администратору безопасности для принятия решений и выполнения необходимых защитных мер.

В современных IDS применяются два различных подхода к детектированию аномальной активности:

— обнаружение на основе сигнатур (Signature-Based Detection);
— обнаружение на основе аномалий (Anomaly-Based Detection).

IDS на основе сигнатур анализируют сетевой трафик путем сопоставления с базой известных шаблонов атак, которая может храниться локально или в облачном хранилище. Хотя такой подход обеспечивает быстрое и точное обнаружение известных угроз, он имеет существенные ограничения: неспособность выявлять новые и полиморфные атаки, необходимость постоянного обновления сигнатур. Кроме того, IDS на основе сигнатур практически не способны обнаруживать атаки «нулевого дня» [5].

Системы обнаружения вторжений, основанные на анализе аномалий, используют несколько методов: машинное обучение (machine learning, ML), статистические методы и методы, основанные на знаниях. В таких системах создаётся «нормальная» модель поведения компьютерной системы. Значительное различие между фиксируемым сетевым трафиком и модельным позволяет предположить наличие вторжения. В большинстве IDS для анализа аномалий применяются методы машинного обучения, которые позволяют устранить недостатки сигнатурного подхода [6]. При этом перспективным подходом является создание комплексных IDS, сочетающих применение сигнатурного анализа и ML [7].

Разработка модели машинного обучения включает выполнение следующих этапов:

— сбор данных о сетевом трафике;
— очистка и подготовка данных для обучения;
— подбор модели, поиск оптимальных гиперпараметров и обучение;
— оценивание качества модели;
— внедрение модели и ее сопровождение.

Безусловно ключевой задачей является подготовка исходных данных для обучения модели. При этом они должны базироваться на максимально полном признаковом пространстве и отражать актуальные типы атак.

Для синтеза моделей машинного обучения, как правило, используются специализированные наборы размеченных данных. Среди них общедоступными и наиболее популярными являются следующие: DARPA1998, KDD Cup 1999, Kyoto 2006, NSL-KDD 2009, ISCX 2012, CTU-13, UNSW-NB15, CIDDS-001, UGR-16, CICIDS 2017, CICIDS 2018 и др. Однако многие исследователи отмечают существенные недостатки их применения и обосновывают необходимость разработки собственных наборов данных для обучения моделей [8].

Синтетические данные — это искусственно сгенерированные данные, которые имитируют реальные, но создаются алгоритмами, а не собираются из естественных источников. Данная методология обладает рядом существенных преимуществ, включая полный контроль над параметрами генерируемого трафика, возможность масштабирования объемов данных и соблюдение требований правового регулирования. Следует отметить, что синтетические данные не являются универсальным инструментом, из-за требований индивидуальной адаптации под специфику каждой конкретной корпоративной сети. Синтетические данные представляют оптимальный подход для проведения контролируемых экспериментов в области анализа сетевой безопасности, отвечая ключевым требованиям научной достоверности.

Создание синтетических данных, характеризующих сетевой трафик требует комплексного подхода, сочетающего специализированное программное обеспечение и контролируемую тестовую среду.

Процесс создания начинается с конфигурации виртуального стенда, представляющего собой изолированную сетевую инфраструктуру, развернутую на платформе виртуализации. В работе использовался экспериментальный стенд на основе двух виртуальных машин с ОС Kali Linux, имитирующих атакующую систему и систему-жертву. Сетевые интерфейсы виртуальных машин настроены в режиме «сетевой мост», что обеспечивает их прямое подключение к физической сети и функционирование в качестве автономных сетевых устройств в пределах локального сегмента. Особенностью этой конфигурации является минимальная сетевая активность виртуальных машин в штатном режиме работы, что позволяет однозначно идентифицировать все поступающие на узлы пакеты данных либо как элементы имитационной атаки, либо как ответные реакции на нее. Такой подход обеспечивает чистоту экспериментальных данных и исключает влияние постороннего сетевого трафика на результаты исследования.

Далее генерируется легитимный и нелегитимный сетевые трафики с использованием специализированного инструментария, позволяющего моделировать различные типы атак с высокой степенью достоверности.

В качестве генератора тестового вредоносного трафика применялась утилита hping3, представляющая собой мощное сетевое средство, интегрированное в стандартный набор утилит операционной системы Kali Linux, не требующее дополнительной установки. Выбор этого инструмента обусловлен его расширенными возможностями по моделированию различных типов DDoS-атак, включая гибкую настройку параметров генерируемых пакетов и широкий диапазон регулируемых характеристик сетевого трафика [9]. Для обеспечения репрезентативности экспериментального исследования использовалась методика последовательной генерации DDoS-трафика с варьируемыми параметрами, включая изменение скорости отправки пакетов и ротацию IP-адресов источников, что позволяет достоверно имитировать сценарии различных распределенных атак. Процедура генерации вредоносного трафика предусматривает циклическое выполнение серии запусков с различными профилями нагрузки, автоматически прекращаемое по завершении заданного интервала сбора данных. Такой подход обеспечивает получение статистически значимой выборки сетевого трафика, необходимой для последующего анализа характеристик атакующих воздействий и верификации методов их обнаружения.

Для снятия легитимного трафика использовался скрипт на языке программирования Python, с использованием библиотеки Scapy. Несмотря на то, что для решения поставленной задачи может быть применён широкий спектр языков программирования, Python представляет собой один из наиболее развитых инструментов в современной компьютерной науке. Это обусловлено наличием детализированной документации, обширной экосистемы библиотек и модулей, а также высокой степенью адаптивности к различным областям исследований. Библиотека Scapy была выбрана благодаря своей способности обеспечивать гибкую настройку параметров сетевых пакетов, широкой поддержке различных сетевых протоколов, удобному Python-интерфейсу и полному доступу к заголовкам пакетов, что делает ее оптимальным инструментом для анализа и генерации сетевого трафика [10].

Разработанный скрипт позволяет захватывать данные канального, сетевого и транспортного уровня модели взаимодействия открытых систем (Open System Interconnection, OSI), приходящие на конечную машину, а также вычисляет разницу во времени между приходом пакетов и сразу записывает их в CSV-файл (Comma-Separated Values).

С целью демонстрации механизма создания синтетического набора данных выбран тип DDoS-атаки «ICMP flood» (Internet Control Message Protocol). Этот тип атаки характеризуется массовой генерацией и направлением на целевой узел сетевых пакетов ICMP, что приводит к исчерпанию его вычислительных ресурсов и канальной пропускной способности. Особую опасность подобные атаки представляют для сетевой инфраструктуры, поскольку такой трафик традиционно обладает более высоким приоритетом обработки по сравнению с другими типами сетевых пакетов.

При анализе ICMP flood-атак ключевое значение приобретает исследование сетевых заголовков на различных уровнях модели OSI. В контексте атаки особый интерес представляет заголовок сетевого (L3) уровня, содержащий критически важные для детектирования параметры. На сетевом уровне анализируются IP-заголовки, содержащие такие значимые поля как TTL (Time To Live) и IP-адреса отправителей, в то время как заголовки ICMP, относящиеся к этому же уровню, предоставляют информацию о типах и кодах пакетов. Анализ сетевых заголовков на различных уровнях модели OSI позволяет выявлять характерные признаки ICMP DDoS-атак, включая совпадение значений TTL у разных отправителей, свидетельствующее о ботнет-активности, аномальные размеры пакетов, указывающие на попытки переполнения буфера, наличие внутренних и локальных IP-адресов как признак подмены, фрагментированные пакеты, нестандартные типы пакетов и равномерные временные интервалы между пакетами, характерные

для автоматизированной генерации трафика. Комплексное рассмотрение этих параметров обеспечивает надежное обнаружение DDoS-атак.

После запуска созданного виртуального стенда инициируется комплексный процесс сбора легитимного трафика. Разработанный скрипт, запущенный на основном вычислительном узле, осуществляет захват легитимного сетевого трафика. Поскольку используется естественный сетевой трафик, формируемый в процессе штатной работы сети, то исключается необходимость применения дополнительных инструментов генерации искусственного трафика. После достижения достаточного объема данных, соответствующего требованиям репрезентативности эксперимента, выполнение скрипта останавливается и результаты записываются в CSV-файл. На рисунке 1 представлена таблица с признаками легитимного трафика, сформированная средствами библиотеки Pandas языка Python.

Поскольку легитимный трафик представляет собой естественный поток данных, передаваемых в процессе нормального функционирования сети, его модификация или искусственное изменение не требуются.

	time_diff	eth_dst	eth_src	...	icmp_type	code
0	0.313016	08:00:27:c1:be:9a	08:00:27:06:f0:02	...	0.0	0.0
1	1007.572317	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8.0	0.0
2	0.799512	08:00:27:c1:be:9a	08:00:27:06:f0:02	...	0.0	0.0
3	1003.844426	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8.0	0.0
4	0.798161	08:00:27:c1:be:9a	08:00:27:06:f0:02	...	0.0	0.0
...	...	...	...	...	...	...
4214	134.507002	f0:57:a6:fd:88:b0	98:de:d0:ef:53:dc	...	0.0	0.0
4216	1.855301	f0:57:a6:fd:88:b0	98:de:d0:ef:53:dc	...	11.0	0.0
4217	0.614267	f0:57:a6:fd:88:b0	98:de:d0:ef:53:dc	...	11.0	0.0
4218	0.699700	f0:57:a6:fd:88:b0	98:de:d0:ef:53:dc	...	11.0	0.0
4219	0.556114	f0:57:a6:fd:88:b0	98:de:d0:ef:53:dc	...	11.0	0.0

4219 rows × 19 columns

Рис. 1. Результат сбора характеристик легитимного трафика

	time_diff	eth_dst	eth_src	...	icmp_type	code	class
0	0.313016	08:00:27:c1:be:9a	08:00:27:06:f0:02	...	0.0	0.0	0
1	1007.572317	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8.0	0.0	0
2	0.799512	08:00:27:c1:be:9a	08:00:27:06:f0:02	...	0.0	0.0	0
3	1003.844426	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8.0	0.0	0
4	0.798161	08:00:27:c1:be:9a	08:00:27:06:f0:02	...	0.0	0.0	0
...	...	...	...	...	...	...	...
4214	134.507002	f0:57:a6:fd:88:b0	98:de:d0:ef:53:dc	...	0.0	0.0	0
4216	1.855301	f0:57:a6:fd:88:b0	98:de:d0:ef:53:dc	...	11.0	0.0	0
4217	0.614267	f0:57:a6:fd:88:b0	98:de:d0:ef:53:dc	...	11.0	0.0	0
4218	0.699700	f0:57:a6:fd:88:b0	98:de:d0:ef:53:dc	...	11.0	0.0	0
4219	0.556114	f0:57:a6:fd:88:b0	98:de:d0:ef:53:dc	...	11.0	0.0	0

4219 rows × 19 columns

Рис. 2. Маркированный набор характеристик легитимного трафика

Для обеспечения возможности контролируемого машинного обучения осуществляется маркировка собранных данных соответствующей меткой легитимного класса (например, 0) (рис. 2).

После завершения этапа генерации легитимного трафика реализуется генерация трафика с признаками выбранной разновидности DDoS-атаки. Для этого на целевой виртуальной машине объекта защиты запускается разработанный скрипт для захвата сетевых пакетов, обеспечивающий фиксацию всей входящей сетевой активности. Перед началом генерации атакующего трафика выполняется этап сетевой разведки с целью определения IP-адреса целевой системы. Для непосредственной генерации злокачественного трафика на виртуальной машине, имитирующей злоумышленника, используется утилита hping3 с вариативным набором параметров. Результат работы утилиты показан на рисунке 3.

```
┌──(kali㉿kali)-[~]
└─$ sudo hping3 -1 --flood --rand-source  192.168.0.105
HPING 192.168.0.105 (eth0 192.168.0.105): icmp mode set, 28 headers + 0 data
bytes
hping in flood mode, no replies will be shown
^C
--- 192.168.0.105 hping statistic ---
1944 packets transmitted, 0 packets received, 100% packet loss
round-trip min/avg/max = 0.0/0.0/0.0 ms

┌──(kali㉿kali)-[~]
└─$ sudo hping3 -1 --faster --rand-source  192.168.0.105
HPING 192.168.0.105 (eth0 192.168.0.105): icmp mode set, 28 headers + 0 data
bytes
^C
--- 192.168.0.105 hping statistic ---
2025 packets transmitted, 0 packets received, 100% packet loss
round-trip min/avg/max = 0.0/0.0/0.0 ms

┌──(kali㉿kali)-[~]
└─$ sudo hping3 -1 --fast --rand-source  192.168.0.105
HPING 192.168.0.105 (eth0 192.168.0.105): icmp mode set, 28 headers + 0 data
bytes
^C
--- 192.168.0.105 hping statistic ---
432 packets transmitted, 0 packets received, 100% packet loss
round-trip min/avg/max = 0.0/0.0/0.0 ms
```

Рис. 3. Результат генерации DDoS-атаки

	time_diff	eth_dst	eth_src	...	ip_dst	icmp_type	code
0	-1.000000	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	192.168.0.105	8	0
1	0.422205	98:de:d0:ef:53:dc	08:00:27:06:f0:02	...	48.25.119.99	0	0
2	0.334507	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	192.168.0.105	8	0
3	0.311484	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	192.168.0.105	8	0
4	0.283606	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	192.168.0.105	8	0
...	...	...	...	...	...	...	...
6544	101.059578	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	192.168.0.105	8	0
6545	0.257860	98:de:d0:ef:53:dc	08:00:27:06:f0:02	...	248.139.55.58	0	0
6546	100.309331	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	192.168.0.105	8	0
6547	100.990807	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	192.168.0.105	8	0
6548	0.720896	98:de:d0:ef:53:dc	08:00:27:06:f0:02	...	45.89.221.209	0	0

6549 rows × 18 columns

Рис. 4. Результат сбора характеристик вредоносного трафика

	time_diff	eth_dst	eth_src	...	icmp_type	code	class
1	0.334507	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8	0	1
2	0.311484	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8	0	1
3	0.283606	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8	0	1
4	0.296679	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8	0	1
5	0.289928	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8	0	1
...	...	...	...	...	...	...	...
3782	100.536918	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8	0	1
3783	99.460220	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8	0	1
3784	101.059578	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8	0	1
3785	100.309331	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8	0	1
3786	100.990807	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8	0	1

3786 rows × 19 columns

Рис. 5. Маркированный набор характеристик нелегитимного трафика

	time_diff	eth_dst	eth_src	...	icmp_type	code	class
0	0.313016	08:00:27:c1:be:9a	08:00:27:06:f0:02	...	0.0	0.0	0
1	1007.572317	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8.0	0.0	0
2	0.799512	08:00:27:c1:be:9a	08:00:27:06:f0:02	...	0.0	0.0	0
3	1003.844426	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8.0	0.0	0
4	0.798161	08:00:27:c1:be:9a	08:00:27:06:f0:02	...	0.0	0.0	0
...	...	...	...	...	...	...	...
3781	100.536918	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8.0	0.0	1
3782	99.460220	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8.0	0.0	1
3783	101.059578	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8.0	0.0	1
3784	100.309331	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8.0	0.0	1
3785	100.990807	08:00:27:06:f0:02	08:00:27:c1:be:9a	...	8.0	0.0	1

8005 rows × 19 columns

Рис. 6. Размеченный набор данных

Собранные данные записываются в CSV-файл и могут быть прочитаны средствами библиотеки Pandas языка Python (рис. 4).

Было установлено, что полученные данные содержат некорректные значения признака «time_diff» (-1), которые должны быть удалены. Также в поле «icmp_type» есть сроки со значением «0», что является ответом операционной системы на DDoS-атаку. Соответствующие наблюдения необходимо удалить.

Далее в полученный набор данных для каждого наблюдения добавляется метка нелегитимного трафика (рис. 5).

На заключительном этапе необходимо объединить подготовленные наборы данных в один файл (рис. 6).

Разработанный подход к созданию синтетического набора данных позволяет осуществлять обучение моделей машинного обучения, с целью обнаружения DDoS-атак. При этом используется программное обеспечение, обеспечивающее формирование как легитимного, так и вредоносного трафика. Преимуществом представленного подходя является возможность его применения для генерации сетевых сессий, характеризующих широкий спектр DDoS-атак. Также формат создаваемых наборов данных обеспечивает его простую интеграцию в большинство известных библиотек и фреймворков машинного обучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солар. Отчет о DDoS-атаках на онлайн-ресурсы российских компаний в 2024 году [Сайт]. — 2024. — URL: https://rt-solar.ru/analytics/reports/5364/#2/ (дата обращения: 25.02.2025).
2. StormWall. DDoS-атаки 2024: Годовой отчет [Сайт]. — 2024. — URL: https://stormwall.pro/resources/blog/ddos-2024-godovoj-otchet (дата обращения: 25.02.2025).
3. Асхатова Л.И., Галимов Э.И., Габдуллин И.М. Архитектура системы обнаружения вторжений [Электронный ресурс] // Электронный научный журнал. — 2015. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/arhitektura-sistemy-obnaruzheniya-vtorzheniy/viewer/ (дата обращения: 07.03.2025).
4. Nuruddeen M., Nur A., Warusia M., Mohd F. Архитектура системы обнаружения вторжений: вопросы и задачи [Электронный ресурс] // Научный журнал «Технологические отчеты Университета Кансай». — 2020. — Т. 62, № 7. — ISSN 0453–2198. — URL: https://www.researchgate.net/publication/344468714_Intrusion_Detection_System_Architecture_Issues_and_Challenges (дата обращения: 30.03.2025).
5. Ashoor A.S., Gore S. Важность системы обнаружения вторжений [Электронный ресурс] // Международный журнал научных и инженерных исследований. — 2010. — URL: https://www.semanticscholar.org/paper/Importance-of-Intrusion-Detection-System-(-IDS-)-Ashoor/f9f623cd8d24a7643c7d3b628ba6e0d550234cfc/ (дата обращения: 15.03.2025).
6. Brison R., Wimmer H., Rebman Jr C. Обнаружение ботнетов в облачных средах с использованием машинного обучения [Электронный ресурс] // 20-й Международный симпозиум по сетевым вычислениям и приложениям (NCA). — 2022. — DOI: 10.48009/3_iis_2022_110. — URL: https://doi.org/10.48009/3_iis_2022_110/ (дата обращения: 12.03.2025).
7. Гетьман А.И., Горюнов М.Н., Мацкевич А.Г., Рыболовлев Д.А. Сравнение системы обнаружения вторжений на основе машинного обучения с сигнатурными средствами защиты информации // Труды ИСП РАН. 2022. №5. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-sistemy-obnaruzheniya-vtorzheniy-na-osnove-mashinnogo-obucheniya-s-signaturnymi-sredstvami-zaschity-informatsii (дата обращения: 18.03.2025).
8. Ring M., Wunderlich S. et al. Computers & Security, vol. 86, 2019, pp. 147–167.
9. Тестирование сетевой безопасности, анонимизация трафика и взлом паролей: обзор инструментов hping3, proxychains и john the ripper. (2023). Международный научно-исследовательский журнал «Модернизация инженерных технологий и науки». https://doi.org/10.56726/irjmets38746/ (дата обращения: 27.03.2025).
10. Rejah Rehim, Effective Python Penetration Testing, Packt Publishing Ltd, 2016 p. 164.

© Новиков Евгений Иванович (novikov_ei@mirea.ru); Афанасьев Вадим Владимирович (afanasev_v@mirea.ru);
Кунин Никита Тимофеевич (kunin@mirea.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.28

ГЕЙМИФИКАЦИОННАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СРЕДА КАК УПРАВЛЯЕМАЯ ОРГАНИЗАЦИОННАЯ СИСТЕМА: МОДЕЛИ И НОТАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

A GAMIFIED EDUCATIONAL ENVIRONMENT AS A MANAGED ORGANIZATIONAL SYSTEM: MODELS AND NATATIONS FOR MANAGING THE SUSTAINABILITY OF EDUCATIONAL PROCESS

K. Nosov
E. Sannikov

Summary. The article is devoted to the formalization of a gamified educational environment as a managed organizational system in the context of digital transformation of education. In contrast to the prevailing psychological and pedagogical interpretations of gamification, the work considers it as a controlling influence that regulates the parameters of students' behavior. Based on system analysis, structural and functional modeling methods, and logical and analytical construction of control contours, a model of a gamified EdTech environment has been developed that includes a managed object, a control subsystem, a digital infrastructure, and external disruptive factors. The functional decomposition was performed using the IDEF0 notation, and the process dynamics was described using BPMN tools, which made it possible to formalize inputs, outputs, control actions, and feedback mechanisms. The concept of the stability of the educational process is introduced as a property of the system to maintain the trajectory of learning activity under the influence of external and internal factors. The levels of stability are highlighted: local, structural and trajectory. It is shown that gamified mechanisms can be interpreted as regulatory signals that ensure adaptability and controllability of educational activity. The results obtained expand the tools of organizational systems management theory in relation to digital educational ecosystems and create the basis for the development of adaptive algorithmic management models in EdTech.

Keywords: gamification, digital educational environment, EdTech, educational system management, organizational system, system analysis, IDEF0, BPMN.

Носов Кирилл Андреевич
Аспирант, ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург
nosowork@yandex.ru
Санников Егор Игоревич
Аспирант, ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург
egor.oruh@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена формализации геймифицированной образовательной среды как управляемой организационной системы в условиях цифровой трансформации образования. В отличие от преобладающих психолого-педагогических интерпретаций геймификации, в работе она рассматривается как управляющее воздействие, регулирующее параметры поведения обучающихся. На основе системного анализа, методов структурно-функционального моделирования и логико-аналитического построения контуров управления разработана модель геймифицированной EdTech-среды, включающая управляемый объект, управляющую подсистему, цифровую инфраструктуру и внешние возмущающие факторы. Функциональная декомпозиция выполнена с применением нотации IDEF0, процессная динамика описана средствами BPMN, что позволило формализовать входы, выходы, управляющие воздействия и механизмы обратной связи. Введено понятие устойчивости образовательного процесса как свойства системы сохранять траекторию учебной активности при воздействии внешних и внутренних факторов. Выделены уровни устойчивости: локальная, структурная и траекторная. Показано, что геймифицированные механизмы могут интерпретироваться как регулирующие сигналы, обеспечивающие адаптивность и управляемость образовательной активности. Полученные результаты расширяют инструментарий теории управления организационными системами применительно к цифровым образовательным экосистемам и создают основу для разработки моделей адаптивного алгоритмического управления в EdTech.

Ключевые слова: геймификация, цифровая образовательная среда, EdTech, управление образовательными системами, организационная система, системный анализ, IDEF0, BPMN.

Введение

Цифровая трансформация образования в последние годы сопровождается активным внедрением геймифицированных механизмов в образовательные платформы. По данным отечественных исследований в сфере EdTech, геймификация становится устойчивым элементом архитектуры цифровых образовательных сред, влияя на поведенческие паттерны обучающихся и параметры вовлечённости [1]. Зарубежные авторы также фиксируют рост интереса к геймифицированным решениям как инструменту повышения учебной активности и удержания в онлайн-курсах [2] [3].

В то же время анализ современной литературы показывает, что большинство работ рассматривают геймификацию преимущественно с позиций педагогической психологии, то есть через категории мотивации, вовлечённости и эмоциональной включённости обучающихся [4] [5] [6]. Управленческий аспект функционирования геймифицированной среды остаётся недостаточно формализованным: отсутствуют модели, описывающие её как целостную организационную систему с входами, выходами, управляющими воздействиями и контурами обратной связи.

Современные исследования цифровых образовательных экосистем подчёркивают необходимость системного описания EdTech-платформ как сложных социотехнических систем, функционирующих в условиях внешних возмущающих факторов и динамики пользовательского поведения [7]. В зарубежных работах 2022–2024 гг. всё чаще используется язык теории управления и системной инженерии применительно к цифровому обучению, однако формализация геймификации как управляемого механизма остаётся фрагментарной [8].

Таким образом, выявляется научная проблема: при наличии значительного массива эмпирических данных о влиянии геймификации на мотивацию и вовлечённость отсутствует формализованная управленческая модель, позволяющая рассматривать геймифицированную образовательную среду как управляемую организационную систему и проектировать устойчивость образовательных процессов.

В рамках настоящего исследования геймифицированная образовательная среда интерпретируется как управляемая организационная система, элементы которой (обучающиеся, цифровая платформа, геймифицированные механизмы, внешняя среда) могут быть формализованы, а их взаимодействие — описано в терминах управляющих воздействий и обратной связи.

С точки зрения теории управления объектом анализа выступает цифровая образовательная система как организационная структура с регулируемыми параметрами функционирования. С психолого-педагогической позиции объектом исследования являются внутренние состояния обучающихся: мотивация, вовлечённость и саморегуляция, рассматриваемые как переменные состояния управляемой системы, через которые опосредуется поведение.

Научная гипотеза заключается в том, что геймифицированная EdTech-среда может быть описана как система с формализуемыми входами, выходами, управляющими воздействиями и контурами корректирующей обратной связи, что позволяет проектировать устойчивость образовательных процессов в условиях цифровой трансформации.

Цель исследования: разработать формальную модель геймифицированной образовательной среды как управляемой организационной системы и предложить нотацию описания контуров управления устойчивостью образовательных процессов.

Используемые методы и стратегия исследования

В настоящем исследовании применён комплекс методологических подходов, обеспечивающих системный, управленческий и концептуально-аналитический анализ геймифицированной образовательной среды как управляемой организационной системы.

Ключевым методом выступает системный анализ, направленный на декомпозицию сложной образовательной среды на элементы, связи и контуры управления. Системный анализ трактуется как совокупность методов исследования сложных объектов посредством структурирования, моделирования и синтеза [9]. Данный подход позволяет формализовать EdTech-среду как систему с входами, выходами, управляющими воздействиями и механизмами обратной связи.

Во-вторых, для обзора и синтеза научных данных использовались методы систематического литературного обзора. Современные исследования по геймификации часто применяют методологию систематического обзора в качестве основы для обобщения эмпирических данных, выявления основных подходов и построения таксономий (см. обзоры по геймификации в образовании 2025 г. [10]; анализ интеграции геймификации и перевёрнутого класса, охватывающий исследования 2022–2024 гг. [11]; работы на основе методологии PRISMA [12]).

Данный метод обеспечивает структурированный анализ публикаций по геймификации образовательных процессов, что важно для выявления текущих исследований и определения дефицита формализованных управленческих подходов.

Третьим методом является структурно-функциональное моделирование, направленное на построение модели целостной системы, включающей:

- компоненты: обучающиеся, платформы, механизмы геймификации;
- управляющие воздействия и возмущающие факторы;
- динамические контуры обратной связи.

Такой подход опирается на принципы теории систем и управления, применяемые в организациях и социотехнических системах, что даёт возможность не только описать структуру, но и формализовать её функционирование.

Структурно-функциональное моделирование осуществлялось с опорой на исследования цифровых образовательных экосистем как объектов управления [13].

Четвёртым методом является логико-аналитическое моделирование управляющих контуров, основанное на синтезе теоретических конструкций и построении гипотез причинно-следственных связей между управляющими сигналами, внутренними состояниями обучающихся и наблюдаемым поведением.

Пятым направлением является интерпретационный анализ психолого-педагогических переменных, поскольку модели геймификации требуют учёта мотивации, вовлечённости и саморегуляции как внутренних состояний системы — это важно для понимания механизмов действия управляющих воздействий.

В совокупности описанные методы позволяют реализовать стратегию исследования, включающую:

— систематизацию существующих методик и эмпирических данных по геймификации;
— формализацию образовательной среды;
— построение логических моделей управления;
— интерпретацию устойчивости образовательных процессов через призму управленческой теории.

Результаты

В результате исследования разработана формализованная модель геймифицированной образовательной среды как управляемой организационной системы, включающая структурную декомпозицию элементов, описание контуров управления и интерпретацию устойчивости образовательного процесса.

Формализация структуры системы

Геймифицированная образовательная среда представлена как организационная система, состоящая из:

— управляемого объекта (обучающийся);
— управляющей подсистемы (геймифицированные механизмы);
— цифровой инфраструктуры (образовательная платформа);
— внешней среды (социальные, институциональные и временные ограничения).

Подобный подход соответствует представлению образовательных организаций как управляемых социотехнических систем [13] [14], где ключевую роль играет согласование управляющих воздействий и поведенческих реакций участников.

Функциональная декомпозиция системы выполнена в логике методологии IDEF0, позволяющей выделить:

— входы (учебные материалы, требования),
— выходы (завершённость заданий, удержание),
— механизмы (цифровая платформа, алгоритмы начисления баллов),
— управляющие воздействия (игровые элементы, рейтинги, уровни).

Функциональная структура геймифицированной образовательной среды как управляемой организационной системы представлена в нотации IDEF0. Данная нотация позволяет формализовать процессы управления образовательной активностью через выделение входов, выходов, управляющих воздействий и механизмов реализации.

На рисунке 1 представлена контекстная диаграмма уровня A0, отражающая функцию «Управление образовательной активностью в геймифицированной цифровой среде».

Применение IDEF0 в моделировании образовательных процессов обосновано в исследованиях по функциональному моделированию управления вузом [15].

Выделение контуров управления

На основе системного анализа разработана модель трёх управленческих контуров:

1. Контур интенсивности (регулирование частоты учебных действий);
2. Контур регулярности (поддержание устойчивости активности);
3. Контур удержания (предотвращение выпадения из образовательного процесса).

Каждый контур описывается как замкнутый цикл: управляющее воздействие → изменение состояния → поведенческая реакция → измерение → корректировка воздействия.

Такая структура соответствует базовой логике управления организационными системами с обратной связью [8].

Для описания динамики управления образовательной активностью в геймифицированной цифровой среде использована нотация BPMN (Business Process Model and Notation), позволяющая формализовать последовательность действий, условия переходов и точки управленческого вмешательства.

В отличие от IDEF0, отражающей функциональную структуру системы, BPMN-модель демонстрирует процессную логику реализации управляющих воздействий и замкнутый контур обратной связи.

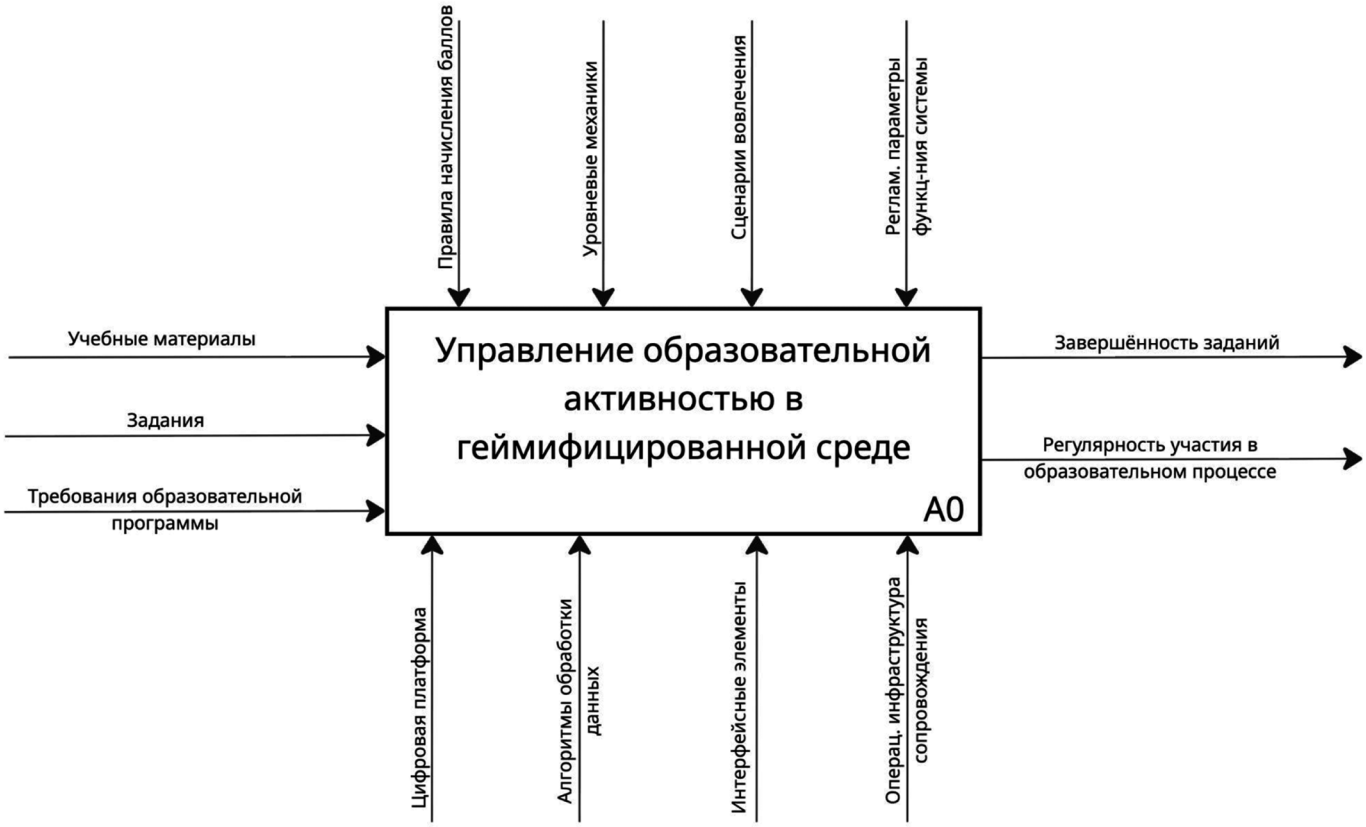


Рис. 1. Контекстная модель IDEF0 уровня A0: управление образовательной активностью в геймифицированной среде

На рисунке 2 представлена процессная модель управления образовательной активностью обучающегося в геймифицированной среде.

Использование BPMN для моделирования образовательных процессов подтверждено в работах по процессному управлению учебной деятельностью [16].

Формализация переменных состояния

В рамках модели выделены переменные состояния системы:

S_1 — уровень учебной активности,

S_2 — регулярность выполнения заданий,

S_3 — степень вовлечённости,

S_4 — риск выпадения.

Геймифицированные механизмы интерпретируются как управляющие сигналы G_i, изменяющие параметры S_j.

Формально динамика может быть представлена в виде:

$$\Delta S = f(G, e, t) \quad (2)$$

где:

G — управляющее воздействие,

E — внешние возмущения,

t –временной параметр.

Такой подход соответствует моделированию динамики организационных систем в условиях неопределённости [17] [18].

Понятие устойчивости образовательного процесса

Введено понятие устойчивости образовательного процесса как свойства системы сохранять траекторию учебной активности при изменении внешних условий.

Выделены три уровня устойчивости:

1. локальная устойчивость (сохранение активности при кратковременных возмущениях),
2. структурная устойчивость (сохранение целостности контуров управления),
3. траекторная устойчивость (сохранение долгосрочной динамики вовлечённости).

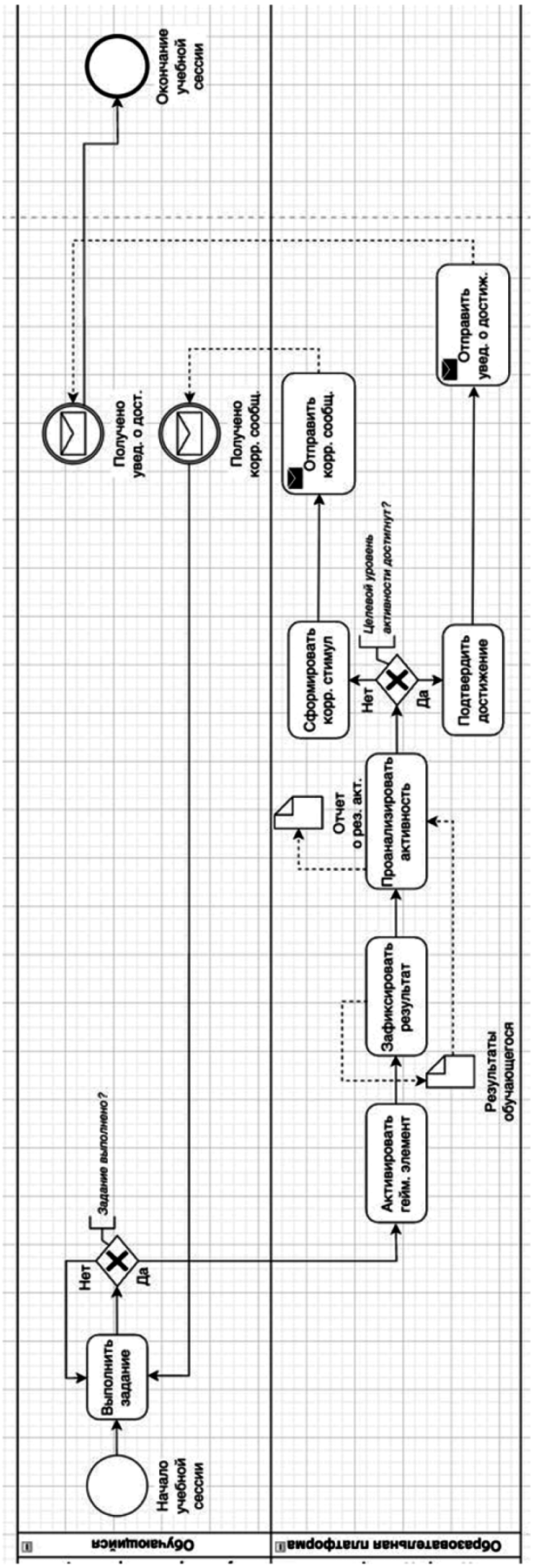


Рис. 2. BPMN-модель процесса управления образовательной активностью в геймифицированной среде

Интерпретация устойчивости опирается на концепции устойчивости организационных систем и цифровых экосистем [19] [20].

Интеграция нотаций моделирования

Для комплексного описания системы предложено комбинированное использование нотаций:

IDEF0 — для функциональной декомпозиции, BPMN — для описания динамики процессов.

Заключение

В работе геймифицированная образовательная среда представлена как управляемая организационная система, функционирующая на основе формализуемых элементов, связей и контуров обратной связи. В отличие от доминирующих исследований, рассматривающих геймификацию преимущественно как инструмент повышения мотивации, в настоящем исследовании она интерпретирована как управляющее воздействие, направленное на регулирование параметров поведения обучающихся.

В результате проведённого системного анализа:
- выполнена структурно-функциональная декомпозиция геймифицированной образовательной среды;
- выделены управляющие и управляемые подсистемы;
- описаны входы, выходы, механизмы и возмущающие факторы;
- сформированы замкнутые контуры управления образовательной активностью.

Разработанная модель позволяет рассматривать геймифицированные механизмы (баллы, уровни, рейтинги, прогресс, сценарии вовлечения) как регулирующие сигналы, изменяющие состояние системы и обеспечивающие управляемую динамику образовательного поведения.

Введено понятие устойчивости образовательного процесса как свойства системы сохранять траекторию учебной активности при воздействии внешних и внутренних возмущающих факторов. Устойчивость интерпретирована на трёх уровнях: локальном, структурном и траекторном, что расширяет управленческий инструментарий анализа цифровых образовательных сред.

Практическая значимость исследования заключается в возможности:
- проектирования геймифицированных платформ на основе формализованных управленческих моделей;
- использования нотаций IDEF0, BPMN и ARIS для описания образовательных процессов;
- прогнозирования динамики вовлечённости и удержания через моделирование управляющих контуров;
- повышения управляемости цифровых образовательных экосистем.

Научная новизна работы состоит в формализации геймифицированной образовательной среды как организационной системы с чётко определёнными элементами управления и разработке модели контуров регулирования устойчивости образовательных процессов.

Полученные результаты могут служить методологической основой для дальнейших исследований в области цифровых двойников образовательных систем, адаптивного алгоритмического управления и разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений в EdTech.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болтышев М.Г. Геймификация цифрового обучения: актуальные проблемы. Информатика и образование. 2022;37(3):28–34. DOI: https://doi.org/10.32517/0234-0453-2022-37-3-28-34
2. Sailer M., Homner L. The Gamification of Learning: a Meta-analysis of Empirical Studies // Educational Psychology Review. — 2022. — Vol. 34. — No. 1. — P. 77–112. DOI: https://doi.org/10.1007/s10648-019-09498-w
3. Lee J., Hammer J. Gamification in Education: What, How, Why Bother? // Academic Exchange Quarterly. — 2011. — Vol. 15. — No. 2. — P. 1–5.
4. Ryan R.M., Deci E.L. (2022). Self-Determination Theory. In: Maggino, F. (eds) Encyclopedia of Quality of Life and Well-Being Research. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-69909-7_2630-2
5. Rosli Mohd Shafie & Saleh nor & Ali Azlah & Bakar Suaibah. (2022). Self-Determination Theory and Online Learning in University: Advancements, Future Direction and Research Gaps. Sustainability. 14(21):14655. DOI: https://doi.org/10.3390/su142114655.
6. Бодруг Н.С. Вовлечение обучающихся в цифровую образовательную среду ВУЗа // Вестник Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета № 2 (174), 2023, С. 24–42.
7. Сулейманкадиева А.Э., Петров М.А., Александров И.Н. (2021). Цифровая образовательная экосистема: генезис и перспективы развития онлайн-образования. Вопросы инновационной экономики, 11 (3), С. 1273–1288. DOI: https://doi.org/10.18334/vinec. 11.3.113470.
8. Williamson B., Macgilchrist F., Potter J. (2023). Re-examining AI, automation and datafication in education. Learning, Media, and Technology, 48(1), 1–5. DOI: https://doi.org/10.1080/17439884.2023.2167830

9. Попов В.Л., Александрова Т.В. Интеграция системного и процессного подходов к управлению предприятием в рамках национального проекта «Производительность труда и поддержка занятости». Управленческие науки. 2021;11(4):71–85. DOI: 10.26794/2404-022X-2021-11-3-71–85.
10. Nascimento S.A.G.C., Souza C.A. de, Oliveira E.D. de, Lima G. S., Nascimento I.J.B.M.F. do, Fagundes J.M., Viana M.C.V., Cardoso R.S., & Júnior T.S.C. (2025). Gamification in Education: A Systematic Review of the Literature. Journal of Tertiary Education and Learning, 3(3), 128–133. https://doi.org/10.54536/jtel.v3i3.5590.
11. Fernández-Velásquez J.D.R., López-Regalado O., & Fernández-Hurtado G.A. (2025). Educational dualism in action: Systematic review of gamification and flipped classrooms' effects on young learners. Contemporary Educational Technology, 17(1), ep557. https://doi.org/10.30935/cedtech/15749
12. Romero-Rodríguez J.-M., Martínez-Menéndez A., Alonso-García S., Victoria-Maldonado J.-J. The reality of the gamification methodology in Primary Education: A systematic review, International Journal of Educational Research, V. 128, 2024, DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijer.2024.102481.
13. Анисимов П.Ф. (2023). Анализ и оптимизация системы качественного управления высшим учебным заведением в контексте цифровизации образовательного процесса в России. Управление образованием: теория и практика, (11–2 (71)), 136–143. doi: 10.25726/y1057-8550–0035-m.
14. Каратаева О.Г., Рузлева А.П., Симаева Е.А. (2024). Цифровая экосистема в образовании. Право и управление, (12), 459–463.
15. Maksimiak I. Application of IDEF0 methodology for creation of a functional model of management of educational activities of a higher educational institution // Applied Mathematics and Control Sciences. 2020. DOI:10.15593/2499–9873/2020.2.07.
16. Листопад Н.И. Модель управления учебным процессом в учреждениях среднего специального образования / Н.И. Листопад, Е.А. Бущик // Цифровая трансформация. 2023. 29 (2). С. 52–59. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-2-52-59.
17. Sterman J.D. System Dynamics Modeling for Organizational Learning // System Dynamics Review. 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/sdr.1715.
18. Sterman J.D. System dynamics modeling: Tools for learning in a complex world // IEEE Engineering Management Review 43(1):42 — 42. 2022. DOI: 10.1109/EMR.2002.1022404.
19. Holling C.S. 1973. Resilience and Stability of Ecological Systems. Annual Review Ecology, Evolution, and Systematics. 4:1–23. https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245.
20. Folke C., Carpenter S., Brian W., Scheffer M., Rockström J. (2010). Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability. Ecology and Society. 15. 10.5751/ES-03610–150420.

© Носов Кирилл Андреевич (nosowork@yandex.ru); Санников Егор Игоревич (egor.oruh@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.31

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕТОДА КОЛЛЕКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ О НЕДВИЖИМОСТИ ЗА РУБЕЖОМ В УСЛОВИЯХ ОТСУТСТВИЯ ШАБЛОНИЗИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ДАННЫХ

DESIGN OF A METHOD FOR COLLECTING INFORMATION ABOUT REAL ABROAD IN CONDITIONS OF THE ABSENCE OF STANDARDIZED DATA SOURCE

A. Pisarev
A. Oganesyan
A. Lomakin

Summary. The article examines the design of an adaptive parsing method for information collection and the development of an automated system for collecting data on foreign real estate oriented toward the Turkish market. The system, developed based on the modeled method, makes it possible to automate the process of obtaining data on price, location, and property characteristics from various sources without the need to consider predefined templates of the structural layout features of the sources. The system includes a module for automated adaptive parsing of web pages and a graphical interface that provides users with the ability to manage the collection process and monitor statuses. The conducted tests confirmed the effectiveness of the system in comparison with classical parsesrs in accelerating data collection processes, minimizing errors, and providing structured data of analytics.

Keywords: automatic information collection, real estate, automation, parsing.

Писарев Андрей Константинович
Волгоградский государственный технический университет
andrey-pisarev-0@mail.ru
Оганесян Артем Артакович
Волгоградский государственный технический университет
gdoq123@yandex.ru
Ломакин Арсений Сергеевич
Волгоградский государственный технический университет;
Волгоградский государственный медицинский университет
arseny.lomakin@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается проектирование метода адаптивного парсинга для сбора информации и разработка автоматизированной системы для коллекционирования данных о зарубежной недвижимости, ориентированной на рынок Турции. Система, разработанная на основе смоделированного метода, позволяет автоматизировать процесс получения данных о цене, местоположении и характеристики объектов, из различных источников без необходимости учитывать заранее заданные шаблоны структурных особенностей вёрстки источников. Система включает в себя модуль автоматизированного адаптивного парсинга веб-страниц и графический интерфейс, предоставляющий пользователям возможность управления процессом сбора и мониторинга статусов. Проведенные тестирования подтвердили эффективность системы в сравнении с классическими парсерами в ускорении процессов сбора данных, минимизации ошибок и обеспечении структурированных данных для аналитики.

Ключевые слова: автоматический сбор информации, недвижимость, автоматизация, парсинг.

Актуальность

Рынок зарубежной недвижимости продолжает демонстрировать рост, обусловленный его инвестиционной привлекательностью и высокой востребованностью среди россиян. Недвижимость остается одним из наиболее надежных способов инвестирования, предоставляя возможности для сохранения и приумножения капитала [1]. Помимо финансовых выгод, такие страны, как Турция и ОАЭ, предлагают дополнительные возможности для нерезидентов, включая программы получения гражданства через покупку недвижимости.

По данным опросов международного брокера недвижимости Tranio русскоязычные покупатели приобретали недвижимость в 2022 [6] прежде всего с целью получить вид на жительство или гражданство (52 % опрошенных), поэтому можно сделать предположение о том, что спрос на покупку недвижимости за рубежом у россиян будет стабильно высоким ближайшее время, в связи с популярностью стран с теплым климатом [7], являющихся стабильными партнёрами России.

Однако для эффективного анализа этого рынка и дальнейшего принятия решений о выгодной покупке

Таблица 1.

Статистика популярных стран
для покупки недвижимости у россиян

Страна	Доля заявок на покупку недвижимости
Турция	23,90 %
ОАЭ	11 %
Грузия	8,90 %
Испания	8,00 %
Греция	7,50 %
Таиланд	5,70 %
Кипр	5,50 %
Черногория	4,30 %
Франция	3,70 %
Италия	3,20 %

недвижимости требуется сбор и обработка большого объема данных, что является затруднительным если использовать только традиционные методы ручного сбора данных или простые парсеры.

Современные технологии автоматизированного сбора данных способны решать проблему высокой трудоемкости и риска ошибок, характерных для ручного мониторинга множества источников [2]. Автоматический сбор информации с веб-страниц, как отмечено в современных исследованиях, предоставляет доступ к актуальной информации напрямую с сайтов, исключая необходимость заключения дополнительных соглашений или использования посредников [3]. Такой подход позволяет получать структурированные данные быстро и без потери точности, но обычно у простых самописных парсеров присутствует проблема, связанная с шаблонизацией алгоритма парсинга под один конкретный источник данных, что исключает применение технологии на разных источниках, даже если они схожи между собой.

Основная сложность — отсутствие единого стандарта представления данных на сайтах, что приводит к необходимости адаптивных методов. Статичные парсеры быстро устаревают (URL: https://www.numberanalytics.com/blog/automated-data-collection-real-estate-insights) при изменении структуры страниц, что требует постоянного ручного обновления кода.

Целью данной работы является создание метода, который позволит оперативно собирать данные о зарубежной недвижимости, минимизировать временные затраты, исключая ошибки ручного мониторинга и невозможность использования классических парсеров с различными источниками данных.

Внедрение метода адаптивного алгоритма парсинга с динамической подстройкой под изменения структуры веб-страниц позволит сделать автоматизированные системы сбора и накопления данных более универсальным инструментом. Предположительно, это повысит эффективность обработки информации, особенно в условиях динамически развивающегося рынка, снижая временные затраты на её поиск и возможные ошибки, связанные с человеческим фактором.

В данной работе предлагается рассмотреть систему для автоматизированного сбора информации о недвижимости, основанной на адаптивном парсере. Работа включает следующие ключевые направления:

1. Анализ актуальности зарубежного направления на рынке недвижимости для российских покупателей;
2. Проектирование метода шаблонно-независимого автоматизированного сбора данных, обеспечивающей эффективную обработку информации из различных источников данных;
3. Разработка системы, включающей автоматизированный сбор данных и графический интерфейс для пользователей.

Анализ предметной области

Рынок недвижимости привлекателен тем, что помимо финансовой прибыли от ее продажи, недвижимость также и сама может приносить пассивный доход. Также можно получать дополнительный доход со сдачи недвижимости в аренду, что является распространенной практикой на сегодняшний день. Платежеспособность домохозяйств и объем предложения объектов недвижимости в краткосрочной перспективе [8] являются ключевыми факторами, определяющими рыночный спрос на недвижимость за рубежом.

Для брокеров недвижимости актуальна задача сбора информации в реальном времени с площадок объявлений, необходимой для постоянного мониторинга и анализа рынка. Обычно, они используют для этого ручной сбор данных, занося интересующие объявления в таблицы, однако некоторые прибегают к современным технологиям и используют самописные парсеры.

В целом, бизнес заинтересован в построении систем адаптивного парсинга, так как это позволяет оптимизировать рабочие процессы (Умный парсинг: [сайт]. URL: https://eclsoft.ru/parsing) и сократить время простоев, которое тратится на рутинную работу, в связи с чем в этой области активно проводятся научные исследования.

На данный момент в научном сообществе активно проводятся исследования, в которые включаются проектирования методов адаптивного парсинга. Так, в ра-

боте (Зеленский И.С., Парыгин Д.С., Савина О.В. Оценка привлекательности недвижимости при комплексном развитии участка территории // Информационное общество: образование, наука, культура и технологии будущего. 2022. № 6. С. 197–206) учёных из Волгоградского государственного технического университета описан алгоритм, позволяющий адаптировать структуру данных и оценочные критерии без изменения кода, что повышает универсальность и адаптивность системы анализа недвижимости. Реализованная подсистема для аналитической обработки открытых данных используется для оценки потребительской привлекательности объектов недвижимости.

В статье (Зеленский И.С., Парыгин Д.С., Савина О.В., Финогеев А.А., Шуклин А.А., Антюфеев А.Ю. Интеллектуальная поддержка решений по использованию объектов недвижимости для управления урбанизированными территориями // International Journal of Open Information Technologies. 2020. №11. С. 13–29) описана архитектура системы, включающая микросервисы «Text Parser» и «Ad Filter», которые обеспечивают адаптивный сбор и анализ данных о недвижимости, что повышает качество принятия решений в управлении урбанизированными территориями.

Зарубежные авторы также активно работают в этом направлении. Так, в работе (Barzin F., Yernaux G., Vanhoof W. ScrImmo: A Real-time Web Scraper Monitoring the Belgian Real Estate Market // Proceedings of the 22nd IEEE/WIC International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT 2023). 2023. P. 335–338) описывается разработка и внедрение веб-скрейпера SCRIMMO, который в режиме реального времени собирает данные о рынке недвижимости Бельгии. Отдельно в нём рассматривается техническая реализации с использованием JavaScript и RESTful API, а также возможностям анализа собранных данных для поддержки принятия решений.

В другом исследовании (Tsonev A., Dyankova V., Yusufov Y. Using web scraping for real estate price analysis // Mathematical and Software Engineering. 2022. Vol. 8, № 1–2, P. 19–23) представлен обзор областей применения веб-скрейпинга для адаптации к динамическим изменениям на рынке недвижимости, а также пример реализации для анализа цен. Помимо прочего, в нём рассматриваются технологии интеграции и обработки больших объёмов данных с различных веб-источников.

В академической среде тема также довольно популярна. Так, работа [17] Оскара Уильямса из MIT посвящена использованию веб-скрейпинга и алгоритмов поиска для выявления возможностей девелопмента и изменения зонирования на основе публичных данных. Разработанная платформа Aiden демонстрирует эффективность автоматизированного сбора и обработки данных для рынка недвижимости.

У самописных парсеров есть ограничения. Чаще всего, это скрипты, занимающиеся разовыми или периодическими выгрузками данных с определенного сайта или источника. У такого подхода есть ряд проблем, связанных, прежде всего, с необходимостью постоянно поддерживать парсер в актуальном состоянии, подстраивая под вводимые изменения в структуру данных и наполнение сайта, а также невозможность использовать подобный парсер в целях сбора аналогичной информации с другого источника данных.

Одним из способов решения проблемы является создание комбинированной методики проверки достоверности данных, сочетающей анализ повторяемости информации на разных источниках, машинное обучение для выявления аномалий и адаптации к изменениям источников объявлений, позволяющий минимизировать частоту доработок парсера при обновлении верстки целевых платформ.

Проектирование системы на основе предложенного метода

Адаптивный метод парсинга веб-страниц, представленный на рисунке 1 основан на комбинировании методов машинного обучения, в частности моделей компьютерного зрения и методов статического парсинга сайтов.

Для реализации метода необходимо создать систему, которая будет позволять брокеру недвижимости собирать заданную целевую значимую информацию (например цена, метраж, геолокация) из разных источников в условиях отсутствия шаблонизированной вёрстки и собирать их в единую коллекцию данных средствами СУБД.

Для этих целей, на текущий момент наиболее рационально использовать библиотеку Nokogiri [9] для составленных требований, потому что она является наиболее надежной библиотекой, так как ее разработка продолжается и по сей день, а следовательно, проблем с совместимостью не возникнет в ближайшей перспективе. Также она предоставляет все необходимые инструменты для сбора данных. Возможные проблемы с загрузкой оперативной памяти, при этом, маловероятны, так как будут обрабатываться данные небольших размеров.

Для адаптации к динамическим изменения вёрстки сайтов и выборки информации с разных видов шаблонов каждая полученная статическим парсером веб-страница обрабатывается методами компьютерного зрения, для чего используется библиотека PyTesseract.

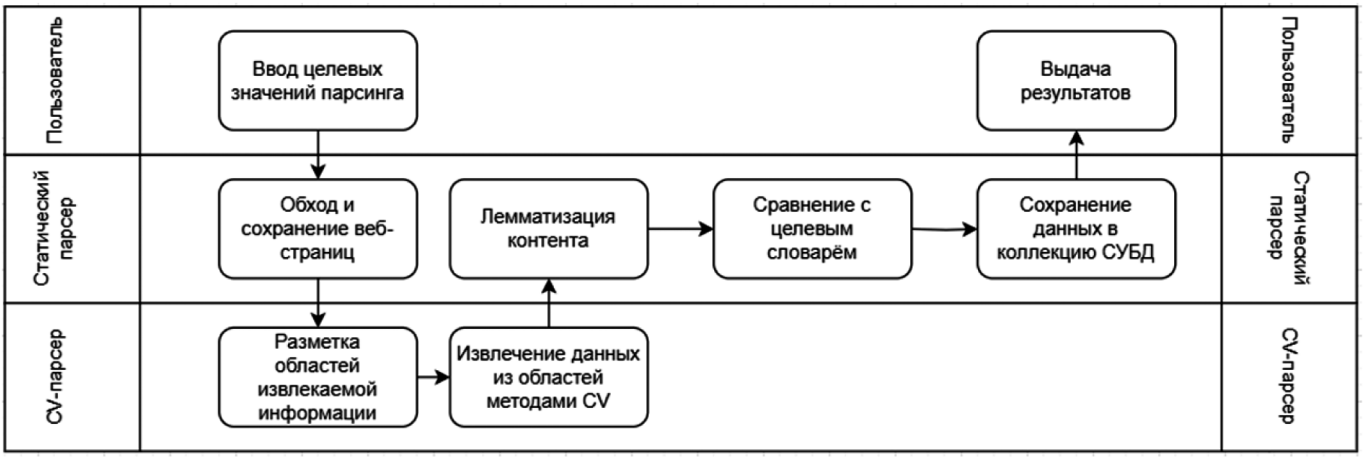


Рис. 1. Предложенный адаптивный метод парсинга

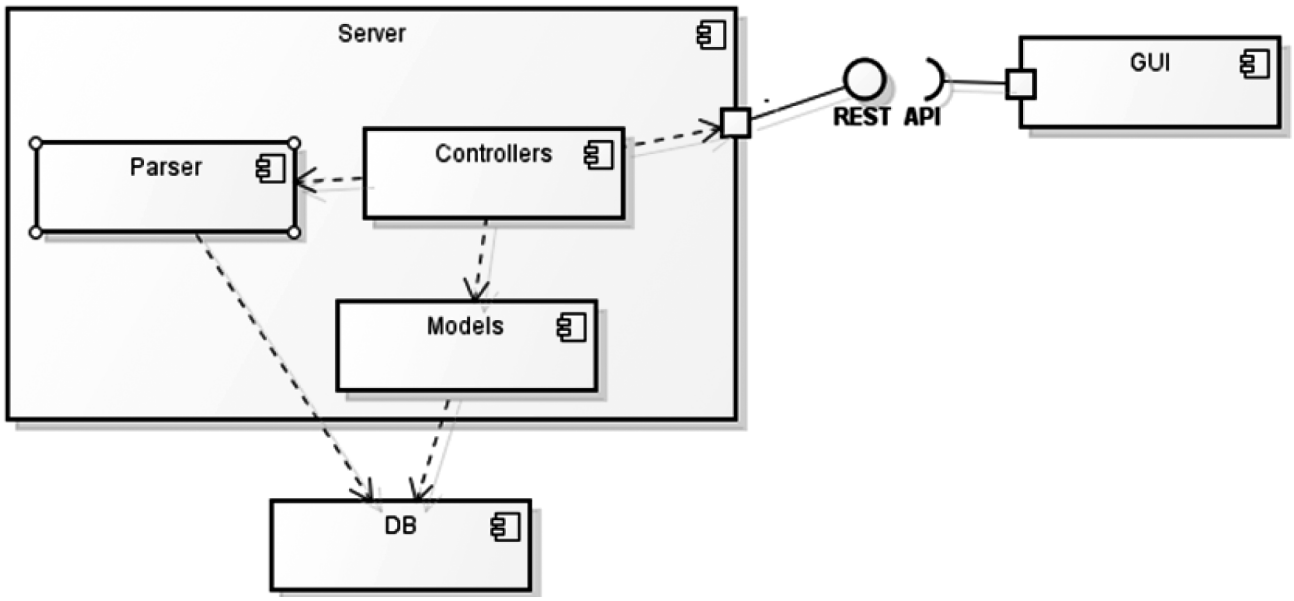


Рис. 2. Диаграмма компонентов системы сбора информации в нотации UML 2.0

У библиотеки есть заданный набор параметров, которые ищутся в полученном файле. Html-документ размечается в соответствии с ожидаемыми значениями на области данных, после чего значения из них лемматизируются.

Полученные наборы данных записываются в структуры данных, именуемые словарями (Map), численные значения которых предварительно переводятся в соответствующий тип данных, после чего данные словари извлекаются в документоориентированный формат JSON.

Полученная структурированная информация затем используется для накопления в СУБД и передаётся пользователю в шаблонизированном виде.

На рисунке 2 представлена диаграмма компонентов разрабатываемой системы, позволяющая применить описанный выше метод в реальной практике.

Разработка и внедрение системы на основе предложенного метода

Разработанная система предназначена для автоматизации составления базы знаний по объектам зарубежной недвижимости, которые содержатся на различных площадках объявлений о недвижимости.

Система состоит из двух модулей: модуля сбора информации и графического интерфейса пользователя, и имеет два способа запуска: через консольный интерфейс и через графический.

Графический интерфейс пользователя предназначен не только для запуска модуля сбора информации, он также имеет дополнительный функционал. С помощью GUI можно в понятном для человека формате следить за процессом парсинга, просматривать результаты работы.

Также добавлена возможность просматривать количество времени, которое уходит на сбор информации, а также получать подробные отчеты в файлах с подробным логгированием о том, как проходил процесс.

Модуль состоит из 9 классов, включая логгер и, классы специфицированные для парсера турецкой недвижимости с веб-страниц источников информации о ней. Их можно разделить на несколько категорий:

— классы, относящиеся к агентству;
— классы, относящиеся к объектам недвижимости;
— общие для первых двух групп классы.

Графический интерфейс пользователя реализуется на базе тестового стенда, в котором уже реализованы механизмы авторизации и регистрации. Для работы с системой автоматизированного сбора информации необходимо авторизоваться. В меню, при наведении на вкладку «Справочники» должен отображаться выпадающий список, последним пунктом которого должен быть, раздел «Парсеры».

Для дальнейшей работы с графическим интерфейсом системы необходимо перейти на вкладку «Парсеры». После перехода на странице отображается таблица с парсерами, содержащая информацию о модулях сбора (название агентства, дата и время начала процесса сбора, дата и время завершения, статус), ссылка на таблицу с логами и кнопка, чтобы можно было запустить процесс сбора информации.

Чтобы запустить модуль сбора информации необходимо нажать на кнопку «Начать парсинг». Кнопка приведёт в действие срабатывание POST-запроса на сервер, который запустит парсер и перезагрузит страницу с таблицей парсеров [11]. В результате статус выбранного

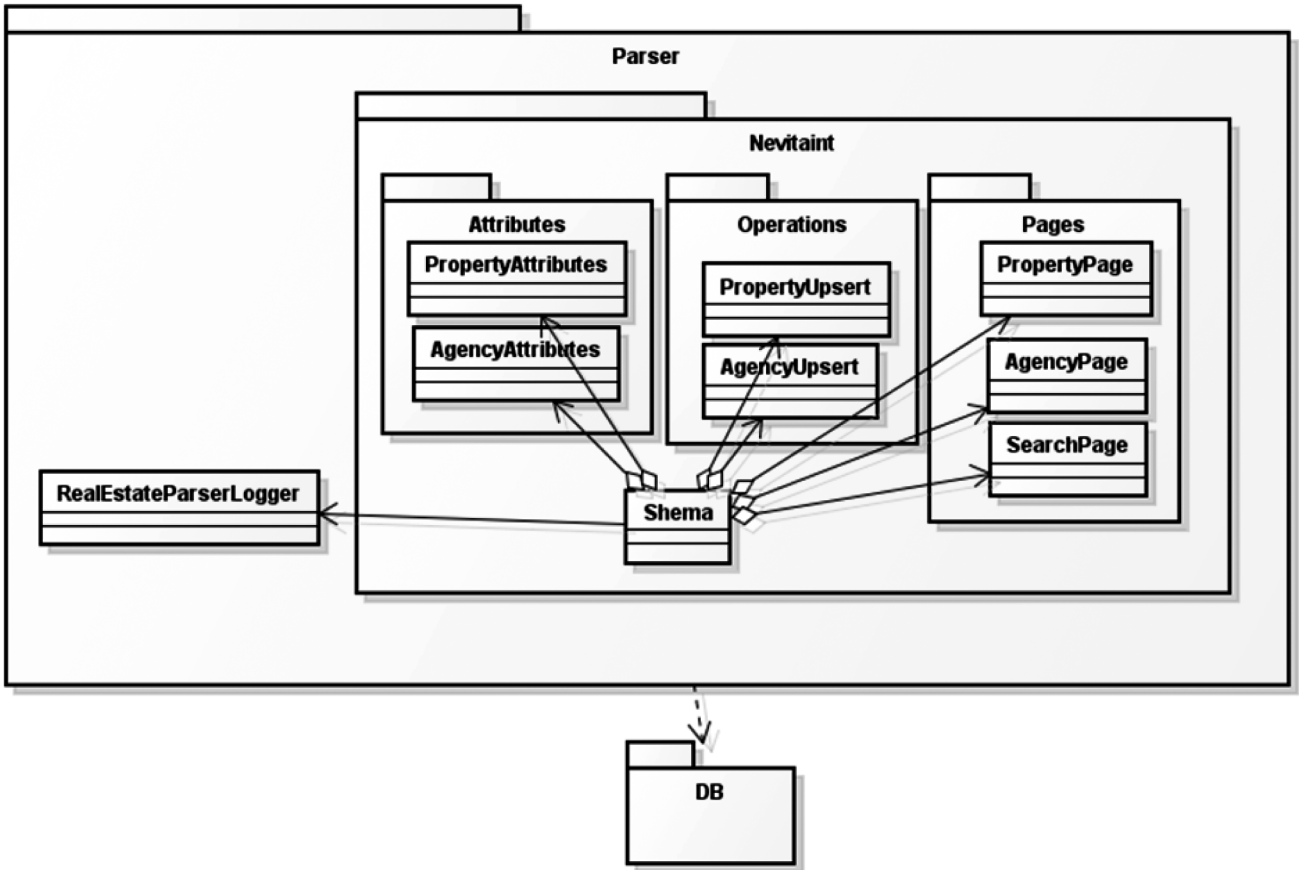


Рис. 3. Диаграмма классов модуля автоматизированного сбора информации о недвижимости в нотации UML 2.0

Главная / Парсеры

Парсеры

№	Агенство	Дата начала	Дата завершения	Статус		
4	nevitaint	30.05.24 19:06	30.05.24 19:07	неуспешно	Логи	Начать парсинг

Рис. 4. Макет таблицы парсеров

Таблица 2.

Полученные экспериментальные данные

Сборщик данных	Участник 1	Участник 2	Участник 3	Участник 4	Участник 5	Система шаблонизированного парсинга	Система с методом ААП
Время, затраченное на сбор информации, мин	45	90	59	43	65	Невозможно применить для разных источников данных	0,9

парсера изменится на статус «в процессе», а дата и время запуска обновятся. Одновременно с этим, в фоновом режиме будет выполняться сбор информации с сайта-источника.

В таблице парсеров отображается информация только из последнего сообщения в лог-файле. Чтобы посмотреть всё содержимое лог-файлов необходимо нажать на ссылку «Логи», после чего откроется страница с таблицей логов, которая содержит информацию о лог-файлах (дата и время начала и завершения парсинга, статус процесса, количество добавленных, удаленных и обновленных объектов недвижимости) и ссылка, позволяющая открыть лог-файл, содержащий все полученные исторические данные о запущенном процессе парсинга в браузере.

Заключение

Для проверки эффективности разработанной системы был проведен эксперимент. Суть эксперимента заключалась в том, чтобы сравнить ручной сбор информации и автоматизированный. В эксперименте приняли участие 5 уверенных пользователей ПК, которым было предложено собрать данные об агентстве недвижимости и объекте недвижимости из объявлений о продаже с веб-страниц площадок объявлений. Для сокращения времени проведения эксперимента. В качестве контрольной выборки, были использованы результаты группы, которой было предложено собрать информацию вручную на ограниченном объёме данных с 10 объявлений.

Во второй части эксперимента была запущена система автоматизированного сбора информации для сбора данных с такого же количества объявлений и того же агентства для повышения объективности результатов эксперимента.

Среднее арифметическое результатов эксперимента показало, что время, потраченное на ручной сбор, составило 60,4 минуты, что более, чем в 108 раз превышает автоматизированный сбор информации. При этом, в ходе ручного сбора были допущены ошибки и опечатки, которые невозможно допустить при парсинге. Так, внедрение автоматизированного подхода позволит многократно сократить время сбора информации о недвижимости.

Итак, предложенный метод автоматического анализа и адаптации к изменениям структуры сайтов с недвижимостью кроме плюсов, состоящих в минимизации частоты доработок парсера при обновлении верстки целевых платформ, также более чем на 99% быстрее справляется с задачей сбора информации и не совершает ошибок и опечаток в рамках разработанной системы, по данным проведенного эксперимента.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанная система, использующая в своей основе метод адаптивного алгоритма парсинга для динамических веб-страниц значительно эффективнее решает проблему, чем ручной сбор информации или применение автоматизированных системы без использования данной методологии, вследствие невозможности применения последних при наличии нескольких динамически изменяющихся источников информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стерник С.Г. Рынок недвижимости и тенденции его развития: учебник. Москва: КноРус, 2023. 130 с.
2. Seferović A., Pejović N. The Integration of AI in Modern Real Estate Market Analysis // Advances in Computational Intelligence and Data Science. Springer, 2024. P. 123–145.
3. Костяшин Н.А. Применение автоматизированных средств сбора информации по сайтам // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2020. № 3(39). С. 11–17.
4. Яхшисарова Р.М. Программная реализация парсинга данных раздела поиска недвижимости сайта avito.ru // Математическое моделирование процессов и систем: материалы VII Международной молодежной научно-практической конференции, Уфа, 07–09 декабря 2017 года / отв. ред. С. А. Мустафина. Часть II. — Уфа: Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», 2017. — С. 437–441.
5. Габдрахманова Л.З. Проблемы инвестирования в зарубежную недвижимость // Современные проблемы развития техники, экономики и общества: материалы II Международной научно-практической очно-заочной конференции, Казань, 04 апреля 2017 года / под ред. А.В. Гумерова. Казань: «Ро́кета Союз», 2017. С. 244–246.

6. Исследование: Русскоязычные покупатели зарубежной недвижимости — 2023 [Электронный ресурс] // Tranio: официальный сайт. URL: tranio.ru/articles/issledovanie-russkoyazychnye-pokupateli-zarubezhnoi-nedvizhimosti-2023/ (дата обращения: 15.12.2025).
7. Статистика: В 2022 году россияне скупали квартиры в Турции, ОАЭ и Грузии тысячами [Электронный ресурс] // Tranio: официальный сайт. URL: tranio.ru/articles/statistika-v-2022-godu-rossiyane-skupali-kvartiry-v-turcii-oae-i-gruzii-tysyachami/ (дата обращения: 15.12.2025).
8. Василенко Ж.А. Методика оценки объектов жилой недвижимости с учетом инвестиционных предпочтений // Инженерный вестник Дона, 2010, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2010/270 (дата обращения 15.12.2025).
9. Hunter Powers Instant Nokogiri: Learning Data Scraping and Parsing in Ruby Using the Nokogiri Gem // Packt Publishing. 2013. P. 52.
10. Земцов А.Н, Болгов Н.В, Божко С.Н. Многокритериальный выбор оптимальной системы управления базы данных с помощью метода анализа иерархий // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2360 (дата обращения: 15.12.2025).
11. Ломакин А.С. Разработка встраиваемой библиотеки для парсинга PDF-отчётов и автоматического интегрирования данных в карту пациента в области офтальмологии // NovaUm.Ru. 2023. № 44. С. 4–7.
12. Harnessing Automated Data Collection for Real Estate Insights [Электронный ресурс]. URL: https://www.numberanalytics.com/blog/automated-data-collection-real-estate-insights (дата обращения: 15.12.2025).
13. Умный парсинг [Электронный ресурс]: сайт. URL: https://eclsoft.ru/parsing (дата обращения: 15.12.2025).
14. Зеленский И.С., Парыгин Д.С., Савина О.В. Оценка привлекательности недвижимости при комплексном развитии участка территории // Информационное общество: образование, наука, культура и технологии будущего. 2022. № 6. С. 197–206.
15. Зеленский И.С., Парыгин Д.С., Савина О.В., Финогеев А.А., Шуклин А.А., Антюфеев А.Ю. Интеллектуальная поддержка решений по использованию объектов недвижимости для управления урбанизированными территориями // International Journal of Open Information Technologies. 2020. №11. С. 13–29. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnaya-podderzhka-resheniy-po-ispolzovaniyu-obektov-nedvizhimosti-dlya-upravleniya-urbanizirovannymi-territoriyami (дата обращения: 15.12.2025).
16. Barzin F., Yernaux G., Vanhoof W. ScrImmo: A Real-time Web Scraper Monitoring the Belgian Real Estate Market // Proceedings of the 22nd IEEE/WIC International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT 2023). 2023. P. 335-338.
17. Williams O. Identifying Real Estate Development Opportunities: Web-Scrapping, Regex Patterns & String-Searching Algorithms: Bachelor's thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2021. URL: https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/139272/williams-oscarw-msred-cre-2021-thesis.pdf (дата обращения: 15.12.2025).

© Писарев Андрей Константинович (andrey-pisarev-0@mail.ru); Оганесян Артем Артакович (gdoq123@yandex.ru);
Ломакин Арсений Сергеевич (arseny.lomakin@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.33

ПРОЦЕССНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ РОСТА EDTECH-КОМПАНИЙ: ЭМПИРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ ЗРЕЛОСТИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

PROCESS CONSTRAINTS ON THE GROWTH OF EDTECH COMPANIES: AN EMPIRICAL ANALYSIS AND INTERPRETATION THROUGH THE LENS OF BUSINESS PROCESS MATURITY

I. Polonikov

Summary. In the context of expanding digital markets, online education has become one of the most dynamically growing sectors of the economy. However, the accelerated scaling of edtech companies is accompanied by increasing operational complexity and growing challenges in manageability. The purpose of this study is to identify process-related constraints on the growth of edtech companies based on the analysis of employee reviews and to interpret them within the framework of business process maturity. The empirical basis of the research consists of 3,406 critical employee reviews from the three largest edtech companies in the Russian market, ranked among the top three by revenue. The reviews were manually coded according to their dominant problem area and subsequently subjected to quantitative analysis. The results show that issues related to business processes account for 45.6 % of all critical comments and significantly outweigh concerns regarding compensation and social benefits. These findings are interpreted as indicators of insufficient maturity of end-to-end business processes that limit the scalability of sales and the sustainability of company growth.

Keywords: edtech, organizational management systems, business processes, business process maturity, process scalability, management system resilience, business process management (BPM); BPMN.

Полоников Илья Валерьевич
Аспирант, Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург
i.polonikov@yandex.ru

Аннотация. В условиях роста цифровых рынков онлайн-образование становится одним из наиболее динамично развивающихся сегментов экономики. Однако ускоренное масштабирование edtech-компаний сопровождается ростом операционной сложности и обострением проблем управляемости. Целью настоящего исследования является выявление процессных ограничений роста edtech-компаний на основе анализа отзывов сотрудников и их интерпретация в рамках концепции зрелости бизнес-процессов. Эмпирической базой исследования послужили 3406 критических отзывов сотрудников трех крупнейших edtech-компаний российского рынка, входящих в топ-3 по выручке. Кодирование отзывов осуществлялось вручную по доминирующей проблематике с последующей количественной обработкой. Результаты исследования показывают, что проблемы бизнес-процессов составляют 45,6 % всех критических замечаний и существенно превосходят по значимости факторы оплаты труда и социальных условий. Полученные данные интерпретируются как индикаторы недостаточной зрелости сквозных бизнес-процессов, ограничивающих масштабируемость продаж и устойчивость роста компаний.

Ключевые слова: edtech, организационные системы управления, бизнес-процессы, зрелость бизнес-процессов, масштабируемость процессов, устойчивость системы управления, управление процессами, BPM, BPMN.

Введение

Рынок онлайн-образования в России в последние годы демонстрирует устойчивую положительную динамику. По данным отраслевых аналитических обзоров Smart Ranking, выручка крупнейших edtech-компаний сохраняет тенденцию роста, что подтверждается регулярными исследованиями российского рынка онлайн-образования [1; 2]. Указанная динамика соотносится с более широким трендом цифровой трансформации образования и институционализацией дистанционных форм обучения [3].

Особенностью edtech-компаний является сочетание интенсивного роста продаж с высокой долей нематериального продукта и зависимостью от человеческого капитала. В отличие от традиционных отраслей, где масштабирование часто достигается за счет стандартизации производства, в онлайн-образовании рост предполагает одновременное увеличение объема взаимодействий между маркетингом, продажами, методологией, поддержкой и продуктовой командой. Это делает процессы более сложными, взаимозависимыми и чувствительными к сбоям координации.

Процессы продаж в edtech-компаниях имеют сквозной характер и включают не только привлечение клиента, но и его сопровождение, адаптацию к продукту, удержание и дополнительные продажи, а также обеспечение качества образовательного сервиса и клиентского опы-

та на всех этапах взаимодействия. Следовательно, сбои на любом этапе цепочки могут снижать не только общую результативность продаж, но и воспринимаемое качество продукта и сервиса, усиливая нагрузку на сотрудников и повышая риски оттока клиентов, что особенно заметно в условиях быстрого масштабирования.

Рост edtech-компаний сопровождается увеличением объема транзакций, усложнением операционной деятельности и расширением сквозных бизнес-процессов, прежде всего процессов продаж и сопровождения клиентов. В условиях недостаточной формализации и управляемости процессов это приводит к снижению согласованности действий, росту транзакционных издержек и ухудшению управляемости [4; 5].

Несмотря на активное развитие исследований в области цифрового образования, большинство работ сосредоточено на анализе образовательных технологий и рыночных факторов, тогда как внутренние процессные ограничения роста остаются недостаточно изученными. Между тем именно зрелость бизнес-процессов рассматривается в современной теории управления как ключевой фактор устойчивого масштабирования организаций [6; 7].

В терминах теории управления edtech-компанию можно рассматривать как сложную распределенную организационную систему, в которой бизнес-процессы выполняют функцию каналов передачи управляющих воздействий, информации и ответственности. При недостаточной формализации процессов контуры управления ослабевают, что снижает устойчивость системы к росту нагрузки и увеличивает вероятность локальных перегрузок и системных сбоев.

Целью настоящей статьи является эмпирическое выявление процессных ограничений роста edtech-компаний и их интерпретация через призму зрелости бизнес-процессов.

Литературный обзор

Концепция зрелости бизнес-процессов получила развитие в рамках исследований по управлению процессами и организационному развитию. Модели зрелости предполагают поэтапное развитие процессов от неформализованного и реактивного состояния к управляемому и оптимизируемому [8].

Обзор моделей зрелости BPM, выполненный Röglinger и соавторами, показывает, что большинство существующих моделей ориентированы преимущественно на диагностику текущего состояния организаций и в меньшей степени поддерживают управляемое развитие процессов [9]. Данное ограничение приобретает особую значимость в условиях быстрого роста компаний, когда отставание формализации процессов от темпов масштабирования приводит к снижению управляемости.

Эмпирические исследования подтверждают наличие статистически значимой положительной связи между зрелостью бизнес-процессов и организационной эффективностью. Так, Kalinowski показывает, что повышение зрелости процессов связано с улучшением операционных и рыночных показателей организаций [10]. Аналогичные выводы представлены в исследованиях, посвященных влиянию BPM-зрелости на результативность сложных и распределенных процессов [11].

В контексте цифровых компаний процессы продаж рассматриваются как сквозные бизнес-процессы, объединяющие маркетинг, привлечение клиентов, заключение сделок и выполнение обязательств. Низкая зрелость данных процессов приводит к снижению скорости, увеличению количества ошибок и ухудшению управляемости роста [7; 11].

Таким образом, существующая литература подтверждает значимость процессной зрелости как фактора роста, однако эмпирические исследования, основанные на восприятии сотрудников и применимые к Edtech-сектору, остаются ограниченными.

Зрелость процессов и масштабирование организаций

В ряде работ зрелость бизнес-процессов рассматривается не только как инструмент повышения эффективности, но и как ключевой фактор масштабируемости организаций. Исследователи отмечают, что при низкой зрелости рост объемов операций часто приводит к перегрузке управленческих механизмов и снижению предсказуемости результатов. В этом контексте процессная зрелость выступает своего рода «организационной пропускной способностью», определяющей, насколько быстро компания может расти без потери управляемости. С позиции теории управления зрелость процессов можно трактовать как степень развитости контуров управления в организационной системе: чем выше зрелость, тем более предсказуемо система реагирует на изменение нагрузки и внешних условий.

Отзывы сотрудников как источник данных о процессах

Отзывы сотрудников все чаще используются в исследованиях организационных проблем как источник данных, позволяющий выявлять **скрытые** дисфункции, которые не всегда отражаются в формальных отчетах менеджмента. В отличие от опросов руководителей, отзывы исполнителей позволяют зафиксировать повсед-

невные проявления процессных сбоев и реальное восприятие управляемости. Такой подход подтверждается исследованиями, использующими данные платформ типа Glassdoor и аналогичных сервисов для диагностики организационных практик, культуры и управленческих проблем [12; 14; 15].

Материалы и методы

Эмпирической базой исследования послужили отзывы сотрудников, размещенные на платформе Dreamjob.ru.

В выборку были включены три крупнейшие EdTech-компании российского рынка, стабильно входящие в топ-3 по выручке согласно отраслевым рейтингам Smart Ranking [1]. Общий объем выборки составил 3543 отзыва, из которых 3406 содержали выраженную критическую проблематику и были включены в анализ.

Выбор именно трех крупнейших игроков обусловлен их системообразующей ролью на российском EdTech-рынке: на них приходится наибольшая доля выручки и клиентской базы, они задают стандарты управленческих практик и в наибольшей степени испытывают давление масштабирования. Поэтому их процессы можно рассматривать как наиболее показательные для анализа ограничений роста в секторе в целом. При этом концентрация на лидерах рынка снижает влияние случайных факторов, характерных для малых и нестабильных компаний, и повышает аналитическую сопоставимость случаев.

Методологической основой исследования выступил контент-анализ текстовых данных, широко применяемый в исследованиях организационных проблем и управленческих практик [12]. Кодирование отзывов осуществлялось вручную двумя независимыми кодировщиками (автор исследования и приглашенный эксперт в области управления процессами). На первом этапе был разработан предварительный кодировочный протокол с четырьмя укрупненными категориями проблем, содержательно определенными следующим образом:

— Проблемы бизнес-процессов — замечания, связанные с организацией работы, управлением нагрузкой, координацией между подразделениями, качеством коммуникаций, прозрачностью решений, регламентами и управляемостью сквозных процессов.
— Заработная плата и карьерный рост — оценки уровня оплаты труда, справедливости вознаграждения, перспектив продвижения и развития внутри компании.
— Социальные гарантии — вопросы, связанные с больничными, отпусками, режимом работы, удаленным форматом, льготами и иными условиями труда.
— Прочие замечания — высказывания, не относящиеся напрямую к перечисленным выше категориям (например, субъективные впечатления о корпоративной атмосфере или индивидуальные конфликтные ситуации). Каждый отзыв кодировался отдельно и вслепую.

Для оценки согласованности кодирования была рассчитана межкодировочная согласованность с использованием коэффициента Коэна (Cohen's kappa), значение которого составило 0,72, что соответствует приемлемому уровню надежности классификации. Таким образом, процедура кодирования обеспечивала достаточную воспроизводимость результатов, что позволяет рассматривать полученные данные как надежную основу для последующего анализа организационной системы управления. В случаях расхождения кодировок применялась процедура согласования: кодировщики совместно обсуждали спорные случаи и принимали итоговое решение на основе согласованных критериев; при сохранении разногласий привлекался третий независимый арбитр.

На втором этапе осуществлялась количественная обработка данных с расчетом частот упоминаний укрупненных категорий проблем.

Результаты

В соответствии с кодировочным протоколом, описанным в разделе «Материалы и методы», были рассчитаны частоты распределения критических отзывов по четырем укрупненным категориям проблем, представленные в табл. 1.

Таблица 1.

Структура доминирующих проблем
(по критическим отзывам, n = 3406)

Группа проблем	Количество отзывов	Доля, %
Проблемы бизнес-процессов	1554	45,6
Заработная плата и карьерный рост	962	28,3
Социальные гарантии	177	5,2
Прочие замечания	713	20,9
Итого	3406	100,0

Интерпретация данных, представленных в табл. 1, позволяет заключить, что в структуре критических замечаний сотрудников доминируют именно процессные дисфункции. Существенный разрыв между долей процессной проблематики и долей замечаний, связанных с оплатой труда и социальными условиями, указывает на системный характер выявленных ограничений. Тем самым результаты подтверждают целесообразность

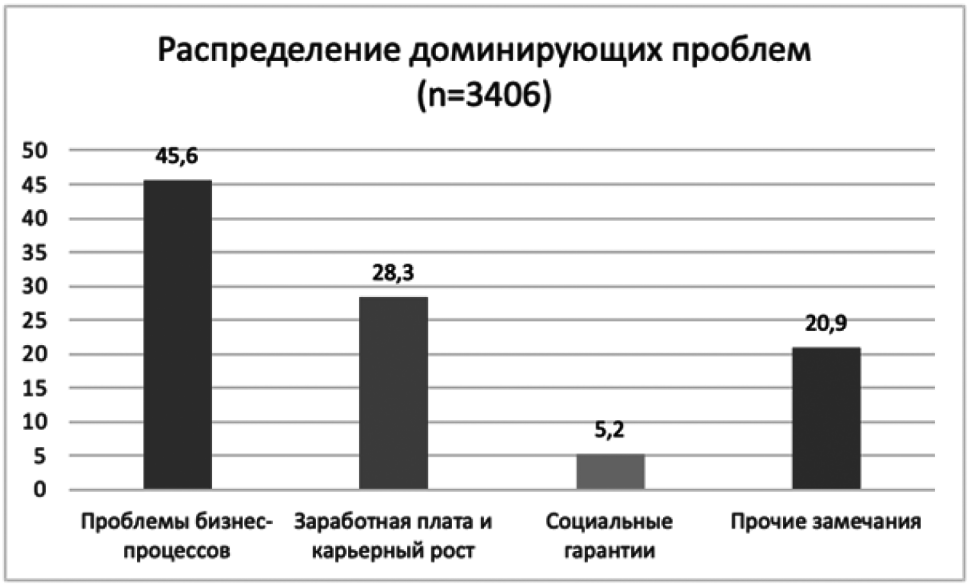


Рис. 1. Распределение доминирующих проблем по критическим отзывам (n = 3406)

интерпретации проблематики через призму зрелости сквозных бизнес-процессов.

Для наглядности структура выявленных проблем представлена также на рис. 1.

Визуализация распределения проблем (рис. 1) подтверждает выраженное доминирование процессной проблематики, что обосновывает последующую интерпретацию результатов через призму зрелости бизнес-процессов.

Анализ показал, что проблемы бизнес-процессов составляют наибольшую долю критических отзывов — 45,6 %, существенно превосходя по значимости факторы оплаты труда (28,3 %) и социальных условий (5,2 %) (см. табл. 1). Полученные данные свидетельствуют о доминировании процессных дисфункций в структуре выявленных проблем.

Интерпретация результатов через измерения зрелости бизнес-процессов

Для углубленной интерпретации полученных результатов используется рамка зрелости бизнес-процессов, понимаемая как совокупность характеристик, отражающих степень формализации, управляемости, измеримости, согласованности и системности улучшений сквозных процессов [9; 10; 7]. Такой подход позволяет перейти от констатации наличия проблем к анализу того, какие именно аспекты процессной зрелости являются дефицитными в EdTech-компаниях.

Сопоставление типовых формулировок критических отзывов с ключевыми измерениями зрелости BPM позволило выделить следующие интерпретации (табл. 2).

Таблица 2.

Соответствие выявленных проблем измерениям зрелости бизнес-процессов

Измерение зрелости	Типовые проявления в отзывах	Процессная интерпретация
Формализация процессов	«непонятно, как работать», «правила постоянно меняются»	Недостаточное описание процессов в формате AS-IS, слабая стандартизация
Управляемость (process ownership)	«неясно, кто отвечает», «решения принимаются хаотично»	Отсутствие устойчивых владельцев процессов и четких зон ответственности
Измеримость процессов	«нет понятных KPI», «результаты оцениваются непрозрачно»	Дефицит систем регулярного измерения и мониторинга процессов
Сквозная согласованность	«плохая коммуникация между отделами», «разрывы между командами»	Недостаточная end-to-end координация процессов продаж и сопровождения
Системное улучшение	«одни и те же проблемы повторяются»	Отсутствие механизмов непрерывного улучшения (TO-BE)

Анализ табл. 2 показывает, что выявленные проблемы концентрируются преимущественно в начальных измерениях зрелости — формализации, управляемости и измеримости процессов. Это соответствует переходному уровню зрелости, при котором рост объемов операций опережает развитие процессных механизмов управления.

С точки зрения классических моделей зрелости BPM, такая ситуация соответствует переходу от реактивного

к управляемому уровню развития процессов: организации уже имеют отдельные регламенты и практики, однако они остаются фрагментарными, плохо согласованными и недостаточно встроенными в систему принятия решений. В условиях быстрого роста это приводит к тому, что управленческие механизмы не успевают адаптироваться к увеличению нагрузки.

В контексте процессов продаж дефицит зрелости проявляется особенно остро, поскольку данные процессы являются межфункциональными и требуют координации между маркетингом, отделом продаж, продуктовой командой и службой поддержки. При недостаточной формализации и измеримости таких взаимодействий даже локальные сбои начинают генерировать системные проблемы, ограничивая масштабируемость продаж и создавая дополнительную нагрузку на сотрудников.

Содержательно это означает, что масштабирование продаж происходит в условиях частично институционализированных процессов: отдельные практики существуют, но они фрагментарны, слабо согласованы и недостаточно поддержаны системами измерения и улучшения. Именно эта комбинация факторов порождает перегрузку исполнителей, рост числа ошибок и снижение предсказуемости операционных результатов, что и фиксируется в отзывах сотрудников.

Системно данные результаты могут быть интерпретированы как свидетельство недостаточной развитости контуров управления в организационной системе EdTech-компаний. Дефицит формализации, измеримости и процессного владения ослабляет обратную связь между управленческими решениями и операционным исполнением, что ограничивает устойчивость системы при масштабировании продаж.

Таким образом, интерпретация данных через измерения зрелости BPM усиливает вывод о структурном характере выявленных ограничений: речь идет не о локальных сбоях, а о системном дефиците процессной зрелости, который проявляется прежде всего в сквозных процессах продаж и масштабирования.

Обсуждение

Доминирование процессных проблем позволяет интерпретировать выявленные дисфункции как структурные ограничения роста EdTech-компаний. В условиях масштабирования продаж увеличение объема операций приводит к росту нагрузки на процессы, что при низкой зрелости выражается в снижении скорости, росте ошибок и ухудшении управляемости [10; 11].

В терминах теории управления организацию можно рассматривать как систему, устойчивость которой определяется качеством ее управляющих контуров. При низкой процессной зрелости эти контуры становятся фрагментарными, что снижает способность системы адаптироваться к росту нагрузки без потери управляемости. Дополнительное сопоставление проблем с измерениями зрелости BPM (см. табл. 2) показывает, что ограничения концентрируются прежде всего в формализации, управляемости и измеримости процессов, что усиливает вывод об их системном характере.

Полученные результаты согласуются с выводами исследований, показывающих, что зрелость BPM оказывает наибольшее влияние на результативность сложных и распределенных процессов, характерных для цифровых компаний [11]. Таким образом, критика бизнес-процессов со стороны сотрудников может рассматриваться как индикатор внутренних ограничений роста, а не как проявление локальных управленческих сбоев.

Заключение

Проведенное исследование показало, что основным ограничением роста EdTech-компаний являются проблемы зрелости бизнес-процессов. Эмпирический анализ отзывов сотрудников выявил доминирование процессных дисфункций, существенно превосходящих по значимости вопросы материального вознаграждения и социальных условий.

Полученные результаты подтверждают необходимость формализации и модернизации сквозных бизнес-процессов, прежде всего процессов продаж и масштабирования, как ключевого условия устойчивого роста EdTech-компаний.

В качестве перспективы дальнейших исследований представляется целесообразным применение стандартизированных инструментов процессного моделирования для формального описания текущих (AS-IS) и целевых (TO-BE) сквозных процессов, включая фиксацию ролей, событий, контрольных точек и вариантов маршрутизации. В частности, нотация BPMN (Business Process Model and Notation), разработанная и поддерживаемая Object Management Group, может быть использована как методическая основа для последующей формализации и проектирования модернизации процессов продаж и масштабирования в EdTech-компаниях [13]. Использование BPMN позволяет рассматривать бизнес-процессы как формальные модели организационной системы управления, пригодные для последующего анализа, симуляции и оптимизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Edtech-рынок вырос в 2024 году на 19 % // Edtechs.ru (при поддержке Smart Ranking). 2025. URL: https://edtechs.ru/analitika-i-intervyu/edtech-rynok-vyros-v-2024-godu-na-19/ (дата обращения: 04.02.2026).
2. Выручка 100 крупнейших EdTech-компаний России за последние пять лет выросла в 10 раз // Forbes Россия. 2025. URL: https://www.forbes.ru/biznes/540220-vyrucka-100-krupnejsih-edtech-kompanij-rossii-za-poslednie-pat-let-vyrosla-v-10-raz (дата обращения: 04.02.2026).
3. Policy Brief: Education during COVID-19 and beyond. New York: United Nations, 2020.
4. Van Looy A., Poels G., Snoeck M. Evaluating Business Process Maturity Models // Journal of the Association for Information Systems. 2017. Vol. 18, No. 6. DOI: 10.17705/1jais.00460.
5. Rosemann M., vom Brocke J. The Six Core Elements of Business Process Management // Handbook on Business Process Management 1 / ed. J. vom Brocke, M. Rosemann. 2nd ed. Springer, 2015. P. 105–122. DOI: 10.1007/978-3-642-45100-3_5.
6. Becker J., Kugeler M., Rosemann M. (eds.). Process Management: A Guide for the Design of Business Processes. Springer, 2003.
7. Loggen T., Ravesteyn P. How Does BPM Maturity Affect Process Performance? // Communications of the IIMA. 2022. Vol. 20, No. 2. DOI: 10.58729/1941–6687.1437.
8. Humphrey W. Managing the Software Process. Addison-Wesley, 1989.
9. Röglinger M., Pöppelbuß J., Becker J. Maturity models in business process management // Business Process Management Journal. 2012. Vol. 18, No. 2. P. 328–346. DOI: 10.1108/14637151211225225.
10. Kalinowski T.B. Analysis of business process maturity and organisational performance relations // Management. 2016. Vol. 20, No. 2. P. 87–101. DOI: 10.1515/manment-2015-0052.
11. Ongena G., Ravesteyn P. Business process management maturity and performance: a multi-group analysis of sectors and organization sizes // Business Process Management Journal. 2020. Vol. 26, No. 1. P. 132–149. DOI: 10.1108/BPMJ-08-2018-0224.
12. Krippendorff K. Content Analysis: An Introduction to Its Methodology. 4th ed. Sage, 2018.
13. Object Management Group. Business Process Model and Notation (BPMN), Version 2.0.2. OMG, 2013. URL: https://www.omg.org/spec/BPMN/2.0.2 (дата обращения: 04.02.2026).
14. Höllig C. Online Employer Reviews as a Data Source: A Systematic Literature Review. 2021. URL: https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/bitstreams/f3c67e9b-ddc1-4243-b358-e9f3bab35aee/download (дата обращения: 04.02.2026).
15. Seo J., Lee S. The moderating effect of organizational culture type on the relationship between cultural satisfaction and employee referral intention: mining employee reviews on glassdoor.com // Journal of Organizational Change Management. 2021. Vol. 34, No. 5. P. 1096–1106. DOI: 10.1108/JOCM-01-2021-0009.

© Полоников Илья Валерьевич (i.polonikov@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.34

КАРТЫ ПОВЕДЕНЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ UEBA

BEHAVIORAL PROFILE CARDS AS A DESIGN TOOL FOR THE UEBA SYSTEM

N. Raevskaya
A. Tsaregorodtsev
E. Bulekova
E. Usenko
A. Petrykina

Summary. In the context of growing cybercrimes, insider attacks pose a significant threat to corporate systems, disguised as legitimate activity. This article explores the use of behavioral profile maps as an innovative tool for designing UEBA (User and Entity Behavior Analytics) systems to detect such threats. It proposes a comprehensive methodology that includes the collection of data from access logs and operation metadata, their structuring, and visualization using machine learning algorithms (k-means, DBSCAN, LSTM, and t-SNE). Special attention was paid to the selection of relevant metrics, such as the frequency of requests to sensitive data and temporal anomalies, as well as integration with SIEM/DLP for prompt response. An experimental A/B test conducted in an IT media holding company confirmed the effectiveness of the approach: false positives were reduced by 80 %, quality metrics improved (Precision 0.91, Recall 0.88, F1-Score 0.89), and the response time was reduced to 5 hours.

The consideration of ethical and legal aspects, including compliance with Federal Law №152, ensured a balance between security and employees' rights. Recommendations for transparent monitoring, data anonymization, and automation of analysis were developed. The practical significance of the work lies in the creation of interpretable dashboards and templates for integration with corporate systems. Further research prospects include the use of large language models for text log analysis, the automation of ethical audits through smart contracts, and the development of monitoring standards for non-standard roles. The proposed approach forms the basis for responsible application of behavioral analytics, combining technical efficiency with ethical standards and minimizing the risks of data leaks.

Keywords: insider threats, cybersecurity, machine learning, behavioral profile.

Раевская Наталья Александровна
ФГАОУ ВО Российский университет дружбы народов, г. Москва
1132247136@rudn.ru
Царегородцев Анатолий Валерьевич
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО Российский университет дружбы народов, г. Москва
tsaregorodtsev-av@rudn.ru
Булекова Екатерина Владимировна
ФГАОУ ВО Российский университет дружбы народов, г. Москва
1132247139@pfur.ru
Усенко Елизавета Алексеевна
ФГАОУ ВО Российский университет дружбы народов, г. Москва
1132247142@pfur.ru
Петрыкина Анастасия Денисовна
ФГАОУ ВО Российский университет дружбы народов, г. Москва
1132247134@pfur.ru

Аннотация. В условиях роста киберпреступлений инсайдерские атаки представляют значительную угрозу для корпоративных систем, маскируясь под легитимную активность. В статье исследуется применение карт поведенческого профиля как инновационного инструмента проектирования систем UEBA (User and Entity Behavior Analytics) для выявления таких угроз. Предложена комплексная методика, включающая сбор данных из логов доступа и метаданных операций, их структуризацию и визуализацию с использованием алгоритмов машинного обучения (k-means, DBSCAN, LSTM, t-SNE). Особое внимание уделено выбору релевантных метрик, таких как частота запросов к конфиденциальным данным и временные аномалии, а также интеграции с SIEM/DLP для оперативного реагирования. Экспериментальное A/B-тестирование, проведенное в ИТ-медиахолдинге, подтвердило эффективность подхода: ложные срабатывания сократились на 80 %, метрики качества улучшились (Precision 0.91, Recall 0.88, F1-Score 0.89), а время реакции снизилось до 5 часов. Учет этико-правовых аспектов, включая соответствие Федеральному закону №152-ФЗ, обеспечил баланс между безопасностью и правами сотрудников. Разработаны рекомендации по прозрачному мониторингу, анонимизации данных и автоматизации анализа. Практическая значимость работы заключается в создании интерпретируемых дашбордов и шаблонов для интеграции с корпоративными системами. Перспективы дальнейших исследований включают применение больших языковых моделей для анализа текстовых логов, автоматизацию этического аудита через смарт-контракты и разработку стандартов мониторинга для нестандартных ролей. Предложенный подход формирует основу для ответственного применения поведенческой аналитики, сочетая техническую эффективность с этическими нормами и минимизируя риски утечек данных.

Ключевые слова: инсайдерские угрозы, кибербезопасность, машинное обучение, поведенческий профиль.

Введение

В условиях цифровой трансформации наблюдается значительный рост киберпреступлений, среди которых инсайдерские атаки представляют особую угрозу. По данным отчета Verizon DBIR-2025 18 % нарушений информационной безопасности связаны с действиями внутренних акторов, использующих легитимный доступ для маскировки злонамеренной активности. В отличие от внешних угроз, такие атаки сложно выявить традиционными методами, основанными на сигнатурном анализе и статичных правилах, которые не адаптируются к динамичным поведенческим паттернам [8, 9]. В частности, высокий уровень ложных срабатываний и задержки в реакции снижают эффективность таких решений [10].

На этом фоне системы класса UEBA (User and Entity Behavior Analytics) становятся перспективным инструментом, обеспечивающим анализ поведения пользователей и сущностей в реальном времени [13]. Однако их проектирование связано с рядом ограничений, включая неполноту обучающих данных, отсутствие маркированных аномалий и сложность интерпретации многомерных метрик [5]. Следовательно, возникает потребность в инновационных подходах, повышающих точность и интерпретируемость анализа. В данном контексте карты поведенческого профиля выступают эффективным решением, структурируя данные и визуализируя ключевые паттерны (например, аномальный доступ к конфиденциальным ресурсам) [16]. Более того, они позволяют интегрировать этические аспекты, обеспечивая баланс между безопасностью и правами пользователей, что подчеркивает их междисциплинарную значимость [3].

Настоящее исследование направлено на разработку методики проектирования систем UEBA на основе карт поведенческого профиля. Основной целью исследования является систематизация сбора данных для моделей машинного обучения посредством визуализации поведенческих метрик [1] и повышение точности обнаружения инсайдерских угроз за счет минимизации ложных срабатываний и адаптации к динамике поведения [7].

Для достижения поставленной цели решаются следующие основные задачи:

1. Провести анализ современных подходов к UEBA, включая сравнение методов обнаружения аномалий (сигнатурные, статистические, Machine Learning (ML)) и выявление их ограничений [9, 11].
2. Разработать модель карт поведенческого профиля, определив релевантные метрики (временные, контекстные) и алгоритмы визуализации (t-SNE, UMAP) с учетом этических критериев [1, 4, 5].
3. Экспериментально оценить эффективность карт профиля посредством A/B-тестирования на корпоративных данных, измеряя метрики качества (precision, recall, F1-Score) [7].
4. Исследовать этико-правовые аспекты внедрения, включая соответствие законодательству РФ, и разработать рекомендации по минимизации рисков [3].
5. Сформулировать рекомендации для мониторинга сотрудников, адаптировав карты для анализа доступа к ресурсам и обеспечив прозрачность политик [16].

Предметом исследования являются методы и алгоритмы построения карт поведенческого профиля, направленные на выявление инсайдерских угроз в корпоративных системах [11].

Объектом исследования выступают системы UEBA, ориентированные на мониторинг поведения сотрудников в корпоративных информационных системах.

Отметим, что объект исследования ограничен внутренними угрозами, исходящими от сотрудников с легитимным доступом [10].

Предполагается, что использование карт поведенческого профиля в системах UEBA позволит снизить уровень ложных срабатываний на 20–25 % и повысить точность обнаружения инсайдерских угроз. Это достигается за счет:

1. Структурированного выбора релевантных метрик (например, доступ к конфиденциальным данным) [16].
2. Адаптации алгоритмов машинного обучения к динамичным паттернам поведения [5].
3. Визуализации аномалий в интерпретируемом формате, ускоряющей принятие решений [1].

Основы UEBA в контексте обнаружения инсайдерских угроз

Системы UEBA (User and Entity Behavior Analytics) предназначены для анализа поведения пользователей и сущностей с целью выявления аномалий, указывающих на инсайдерские угрозы [10]. В частности, они фокусируются на мониторинге сотрудников с легитимным доступом, чьи действия могут маскироваться под нормальную активность [15]. Архитектурное решение UEBA включает три ключевых этапа сбора и обработки данных. Во-первых, сбор данных из логов доступа (например, к базам данных, CRM) и метаданных операций (время, тип действий) с использованием SIEM-систем [6]. Во-вторых, анализ поведения посредством эталонных моделей, формируемых на основе исторических данных, и применения алгоритмов машинного обучения, таких как кластеризация (k-means, DBSCAN) и анализ временных рядов (LSTM) [1, 4, 5]. Наконец, реакция на угрозы,

которая реализуется через интеграцию с DLP для блокировки подозрительных действий [15].

Несмотря на большой потенциал, традиционные UEBA имеют ряд ограничений, таких как высокий уровень ложных срабатываний из-за статичных правил, слабая адаптивность к динамичным паттернам и сложность интерпретации уведомлений (alerts) [8].

Так, сигнатурные системы и системы, основанные на правилах, используют статичные шаблоны, не учитывающие динамику поведения сотрудников [8]. Например, повышение уровня доступа сотрудника ошибочно интерпретируется как аномалия, что увеличивает ложные срабатывания. Статистические методы, такие как Z-score, выявляют отклонения от средних значений, но игнорируют контекст, например, сверхурочную работу над проектами [7]. Методы глубокого обучения (LSTM, автоэнкодеры) эффективны для сложных паттернов, однако их низкая интерпретируемость затрудняет принятие решений ИБ-командами, создавая эффект «черного ящика» [5].

Ключевые ограничения традиционных UEBA включают высокий уровень ложных срабатываний (до 40 % уведомлений по данным Gartner, 2022), неструктурированность данных и слабую интеграцию с операционными процессами [8]. Из-за этих недостатков возникает потребность в инструментах, повышающих точность и адаптивность. Карты поведенческого профиля устраняют указанные проблемы, обеспечивая контекстную фильтрацию метрик (например, приоритет доступа к конфиденциальным данным), интерпретируемую визуализацию аномалий и динамическое обновление моделей [2, 18]. Следовательно, они повышают эффективность UEBA, снижая ложные срабатывания до 12–15 %, как демонстрируют исследования [7]. Таким образом, карты профиля создают основу для дальнейшей экспериментальной проверки их преимуществ.

Алгоритм построения карт поведенческого профиля

Эффективное функционирование систем UEBA для выявления инсайдерских угроз требует комплексной архитектуры, обеспечивающей мониторинг, анализ и интерпретацию поведения сотрудников [11]. С использованием карт поведенческого профиля архитектура приобретает дополнительные преимущества. Карты структурируют метрики, устраняя информационный шум, и поддерживают динамическое обновление моделей в соответствии с изменениями поведения [7, 8]. Как показывают исследования, это сокращает ложные срабатывания до 12–15 % и повышает точность обнаружения событий [7]. Следовательно, архитектура обеспечивает гибкость, масштабируемость и высокую интерпретируемость. Таким образом, использование карт профиля оптимизирует процессы мониторинга, создавая надежную основу для внедрения UEBA в корпоративных системах.

Разработка карт поведенческого профиля для систем UEBA направлена на структуризацию данных и выявление инсайдерских угроз с высокой точностью и интерпретируемостью [16]. В частности, предложенный алгоритм включает пять последовательных этапов, обеспечивающих автоматизированный анализ поведения сотрудников и оперативное обнаружение аномалий в корпоративных системах.

Первый этап — сбор и предобработка данных — аккумулирует логи доступа (например, к репозиториям кода), метаданные операций (время, тип действий) и контекстные параметры (роль, проект сотрудника) через SIEM-системы или потоковые платформы, такие как Apache Kafka [6]. Данные нормализуются (Min-Max) и фильтруются для устранения шума, что повышает качество анализа [3]. Второй этап — выбор метрик — определяет ключевые показатели: частота запросов к конфиденциальным данным, объем скачиваемых файлов, временные отклонения (например, доступ в нерабочие часы) [7]. Третий этап — кластеризация — применяет алгоритмы k-means для группировки типичных паттернов и DBSCAN для выделения аномалий, таких как несанкционированный доступ к исходному коду [1, 15]. Для анализа динамики поведения используется LSTM, эффективный для временных рядов [5]. Четвертый этап — снижение размерности — реализуется посредством t-SNE, преобразуя многомерные данные в двумерные для визуализации [1]. На заключительном этапе создаются интерактивные дашборды (диаграммы рассеяния, тепловые карты), отображающие аномалии в доступном формате, упрощающем анализ ИБ-командами [16].

Пример работы алгоритма: в ИТ-медиахолдинге разработчик, обычно работающий с 10:00 до 19:00 над внутренними проектами, получил доступ к репозиторию с конфиденциальным кодом рекламной платформы в 02:00, скачав 5 ГБ данных. Логи фиксируют метрики: время доступа (02:00), объем данных (5 ГБ), тип операции (скачивание). После нормализации данных и кластеризации (DBSCAN) алгоритм выделяет эту активность как аномалию, не соответствующую эталонному профилю, сформированному k-means на основе исторических данных разработчика. LSTM подтверждает отклонение, анализируя временной ряд операций. t-SNE визуализирует аномалию как точку, удаленную от кластера типичного поведения, на дашборде в виде диаграммы рассеяния, сигнализируя ИБ-команде о потенциальной утечке кода [16].

На основании предложенного алгоритма карты профиля обеспечивают ряд преимуществ. Во-первых, контекстная фильтрация метрик снижает ложные сраба-

тывания до 12–15 %, как показывают исследования [7]. Во-вторых, визуализация ускоряет принятие решений, выделяя аномалии в интуитивно понятном формате [11]. Кроме того, динамическое обновление моделей адаптирует профили к изменениям поведения, поддерживая актуальность анализа [5]. Алгоритм демонстрирует высокую эффективность, достигая F1-Score до 0.89 в экспериментальных тестах [1]. Таким образом, предложенный подход создает надежную основу для интеграции карт поведенческого профиля в системы мониторинга, обеспечивая оптимальный баланс между точностью, интерпретируемостью и операционной эффективностью.

Рассмотрим внедрение системы UEBA с использованием карт поведенческого профиля в ИТ-медиахолдинге, специализирующемся на цифровых сервисах и рекламных платформах, для предотвращения утечек конфиденциальных данных и исходного кода [7]. В частности, кейс направлен на мониторинг поведения разработчиков и аналитиков, имеющих доступ к репозиториям кода и базам пользовательских данных.

Система UEBA интегрирована с SIEM для сбора логов доступа, метаданных операций и контекстных параметров (роль, проект) [3, 6]. Карты профиля формировались на основе метрик: частота запросов к репозиториям, объем скачиваемых данных, временные аномалии (например, доступ в нерабочие часы) [16]. Алгоритмы k-means и DBSCAN кластеризовали типичное поведение, а LSTM анализировал динамику операций [1, 4, 5]. Визуализация через t-SNE отображала аномалии на дашбордах (диаграммы рассеяния). Реакция автоматизировалась через DLP, блокируя подозрительные действия [15].

За два месяца мониторинга выявлено четыре инсайдерских инцидента, включая попытку экспорта кода рекламной платформы в 03:00. Метрики качества [14]: Precision 0.91 (+40 % по сравнению с традиционной UEBA [1]), Recall 0.88 (+22 %), F1-Score 0.89 (+31 %). Ложные срабатывания сократились на 80 % (с 20 до 4 уведомлений в день), время реакции снизилось до 5 часов. На основании результатов карты профиля была повышена интерпретируемость, упрощая анализ аномалий, таких как несанкционированный доступ [11]. Следовательно, пилотное внедрение подтвердило эффективность подхода, минимизируя риски утечек. Таким образом, карты профиля демонстрируют практическую ценность для компаний, обеспечивая точность и оперативность мониторинга.

Постановка эксперимента

Для оценки эффективности карт поведенческого профиля в системах UEBA проведено тестирование в условиях ИТ-медиахолдинга. В частности, методология тестирования была направлена на сравнение UEBA с картами профиля и традиционной UEBA для выявления инсайдерских угроз, таких как утечка исходного кода или пользовательских данных.

Датасет включал логи доступа 1500 сотрудников (разработчики, аналитики) за 6 месяцев, содержащие метаданные операций (время, тип действий, объем данных) и контекст (роль, проект) [3, 6]. Искусственно было добавлено 50 сценариев атак, включая несанкционированный доступ к репозиториям кода в нерабочие часы [7]. Метрики качества: Precision, Recall, F1-Score, количество ложных срабатываний, время реакции [1]. Тестирование проводилось методом A/B: группа A использовала UEBA с картами профиля (k-means, DBSCAN, LSTM, t-SNE для визуализации), группа B — традиционную UEBA с сигнатурными правилами [1, 4, 5]. Дашборды (диаграммы рассеяния) отображали аномалии для анализа ИБ-командами [16].

Статистический анализ включал t-тест для сравнения метрик и оценку доверительных интервалов (p-value <0.05) [3]. Экспертная оценка (10 ИБ-аналитиков) анализировала удобство дашбордов по шкале 1–5. На основании методологии тестирование подтвердило гипотезу о снижении ложных срабатываний и повышении точности. Таким образом, подход обеспечил объективную оценку эффективности карт профиля в условиях ИТ-медиахолдинга.

Для демонстрации методики использовались стандартизированные поведенческие признаки пользователя (уровень активности, среднее число запросов в день, объём скачанных данных, число обращений к чувствительным ресурсам, число уникальных ресурсов). В статье представлены два набора визуализаций: (i) общая матрица поведенческих профилей организации (рис. 1) — иллюстрация распределения ролей в компании; (ii) экспериментальный набор для пяти целевых ролей IT-медиахолдинга (Разработчики, Операционные (DevOps), Аналитики данных, Менеджеры, HR) в контексте крупных ИТ-компаний России (рис. 2–6).

Использовалось 2 параметра: активность пользователя и уровень потенциального риска. Приоритетными квадрантами для анализа поведения являются «Подозрительные действия» и «Потенциальные аномалии», содержащие высокорисковые роли.

Для формирования поведенческих профилей использовалась кластеризация k-means (k=5) с последующей интерпретацией когорт (рис. 3). Кластеризация выделяет устойчивые паттерны поведения, которые можно использовать как «нормальные» профили для последующего мониторинга отклонений. Для обнаружения аномалий применялись: DBSCAN — плотностный детектор (выделяет «шумовые» наблюдения), IsolationForest — скоринговый подход для ранжирования подозри-

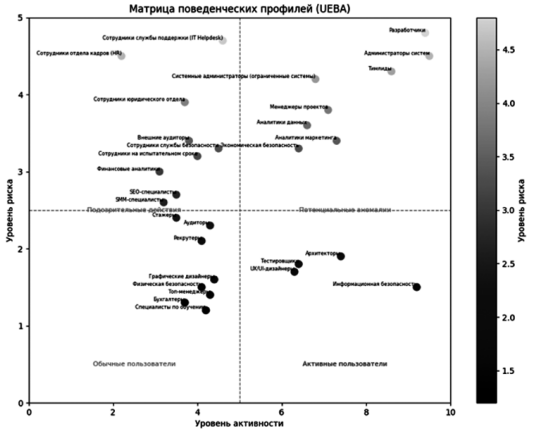


Рис. 1. Матрица поведенческих профилей организации (обобщённая карта).
Оси: Уровень активности (X, 0–10) и Уровень риска (Y, 0–5). Пунктирные линии показывают границы квадрантов; подписи квадрантов: «Обычные пользователи», «Активные пользователи», «Подозрительные действия», «Потенциальные аномалии»

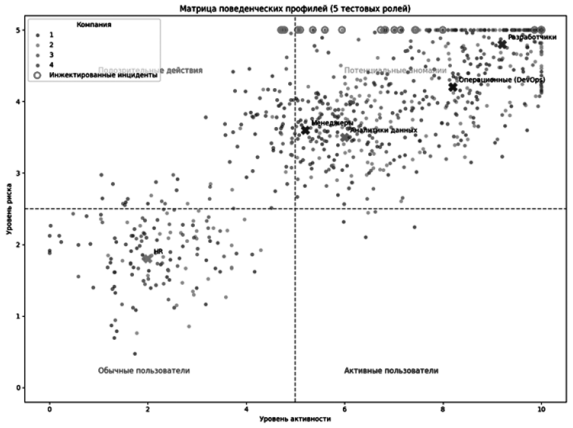


Рис. 2. Матрица поведенческих профилей для пяти тестовых ролей ИТ-медиахолдинга. Красным кружком обозначены инжектированные инциденты. На рис. 2 видно, что основная масса инцидентов сосредоточена в квадрантах «Подозрительные действия» и «Потенциальные аномалии», что подтверждает практическую значимость приоритизации этих зон для SOC

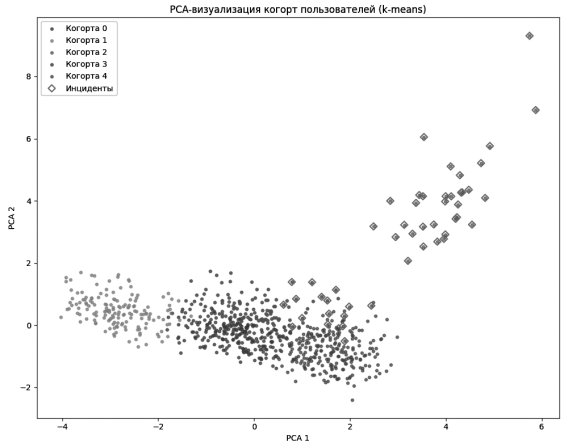


Рис. 3. PCA-визуализация поведенческих когорт, полученных методом k-means (k=5). Маркеры-ромбы обозначают синтетические инциденты

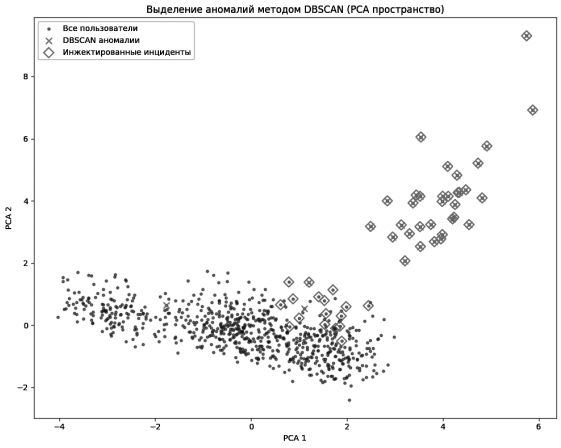


Рис. 4. Выделение аномалий методом DBSCAN в PCA-пространстве. Крестиками отмечены объекты, определённые DBSCAN как шум; ромбами — синтетические инциденты

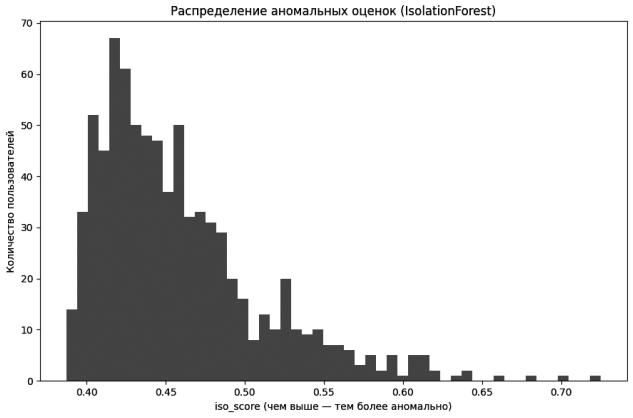


Рис. 5. Гистограмма распределения аномальных оценок, рассчитанных IsolationForest (высота столбцов демонстрирует повышение аномальности). IsolationForest удобен для ранжирования и формирования top-N списков для расследования SOC.

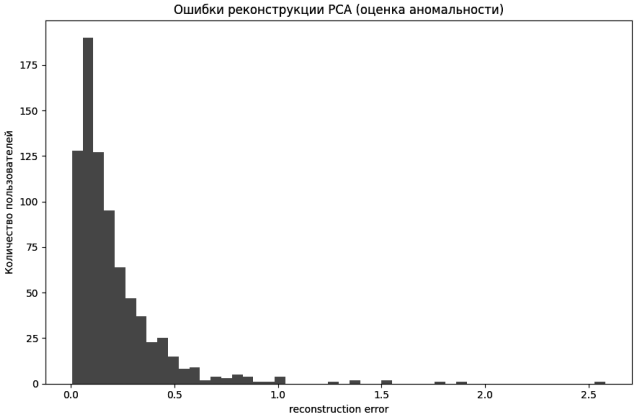


Рис. 6. Гистограмма ошибок реконструкции PCA; наблюдения с большой ошибкой считаются потенциально аномальными. PCA-реконструкция выступает как недорогой proxy для автоэнкодера и хорошо выявляет слабые отклонения, не видимые простыми порогами.

тельных пользователей по степени аномальности, и PCA-reconstruction (proxy автоэнкодера) — анализ реконструкционной ошибки как индикатор скрытых отклонений (рис. 4–6). DBSCAN демонстрирует способность выявлять локальные выбросы, часто совпадающие с инжектированными инцидентами (см. показатели Precision/Recall в табл. 1). Такой набор методов обеспечивает баланс между интерпретируемостью (когорты) и чувствительностью к редким событиям (анализ ошибок и ансамблевый скоринг) [1].

Анализ полученных результатов

Тестирование системы UEBA с картами поведенческого профиля подтвердило эффективность предложенного подхода в выявлении инсайдерских угроз, таких как утечка исходного кода или пользовательских данных. В частности, A/B-тестирование сравнивало UEBA с картами профиля (группа A) и традиционную UEBA с сигнатурными правилами (группа B) на датасете из логов 1500 сотрудников.

Группа A, использующая k-means, DBSCAN, LSTM и t-SNE для кластеризации и визуализации, выявила 48 из 50 искусственных сценариев атак, включая несанкционированный доступ к репозиториям кода в 02:00. Группа B обнаружила 39 сценариев, пропустив аномалии с низкой интенсивностью. Табл. 1 представляет ключевые метрики эффективности.

Таблица 1.

Метрики A/B-тестирования

Группа	Precision	Recall	F1-Score	Ложные срабатывания (в день)	Время реакции (ч)
Группа A (UEBA с картами профиля)	0.91	0.88	0.89	4	5
Группа B (традиционная UEBA/SIEM)	0.65	0.71	0.68	20	12

Статистический анализ (t-тест, p-value <0.05) подтвердил значимость улучшений: Precision (+40 %), Recall (+22 %), F1-Score (+31 %) в группе A. Ложные срабатывания сократились на 80 %, время реакции — на 58 %. Экспертная оценка дашбордов (средний балл 4.5/5) отметила их интуитивность для анализа аномалий. На основании результатов карты профиля повысили точность и оперативность UEBA. Таким образом, внедрение подхода в ИТ-медиахолдинге демонстрирует его практическую ценность для защиты конфиденциальных данных. Детальное сравнение внутренних детекторов представлено в табл. 2 (результаты на синтетическом эксперименте с пятью ролями). Для практического развёртывания рекомендуется комбинировать детекторы: DBSCAN для выдачи высокоточечных уведомлений и IsolationForest для приоритизации расследований SOC [14].

Ниже представлены результаты пилотного тестирования модели, а также сформированные на тестовых данных результаты работы модели.

Таблица 2.

Сравнительная эффективность детекторов (синтетический эксперимент, 5 ролей)

Метод	Precision	Recall	F1	ROC AUC
DBSCAN	0.944	0.680	0.791	—
IsolationForest (top N)	0.600	0.600	0.600	0.900
PCA-recon (top-N)	0.400	0.400	0.400	0.810
k-means (когорты)	n/a	n/a	n/a	n/a

Табл. 2 показывает результаты сравнительного теста трёх детекторов на синтетическом наборе для пяти ролей. DBSCAN даёт высокую точность при умеренной полноте; IsolationForest обеспечивает хорошее ранжирование (ROC AUC = 0.90); PCA-reconstruction выступает как слабый proxy-детектор в данной настройке.

Ограничения

Тестирование системы UEBA с картами поведенческого профиля выявило ряд ограничений, влияющих на внедрение и эффективность подхода в условиях защиты конфиденциальных данных и исходного кода [7]. Все ограничения рассматриваются с точки зрения технических и методологических аспектов. Этико-правовые вопросы, связанные с мониторингом поведения сотрудников для предотвращения утечек кода и данных, в данной статье не рассматриваются.

Технически, качество карт профиля зависит от полноты логов, собираемых через SIEM-системы. Неполные данные (например, отсутствие логов доступа к новым репозиториям) снижают точность кластеризации (k-means, DBSCAN) и анализа временных рядов (LSTM) [1, 4, 5]. Методологически, выбор метрик (частота запросов, временные аномалии) требует адаптации под специфику проектов, что усложняет унификацию для разных команд разработчиков. Этически, мониторинг поведения сотрудников, включая доступ к коду в нерабочие часы, вызывает вопросы конфиденциальности, особенно при несоответствии федеральным законам, таким как ФЗ №152. Кроме того, высокая вычислительная нагрузка t-SNE ограничивает масштабируемость на больших датасетах [1].

На основании выявленных ограничений рекомендована доработка: интеграция дополнительных источни-

ков данных, автоматизация выбора метрик и разработка прозрачных политик мониторинга [11].

Заключение

Проведенное исследование подтвердило эффективность карт поведенческого профиля как инструмента повышения точности систем UEBA при обнаружении инсайдерских угроз. Внедрение методики в ИТ-медиахолдинге позволило снизить уровень ложных срабатываний на 80 % за счет приоритизации релевантных метрик, таких как доступ к конфиденциальным данным и аномальная активность в нерабочее время. Точность детектирования увеличилась (F1-Score: 0.89), а время реакции ИБ-команд сократилось с 12 до 5 часов, минимизируя потенциальный ущерб от утечек.

Перспективы дальнейших исследований включают развитие гибридных аналитических систем, сочетающих статистические и генеративные модели, а также интеграцию анализа текстовых логов, тикетов и переписки с использованием LLM для семантической интерпретации контекста инцидентов. Перспективным направлением является создание мультиагентных систем для SOC, где отдельные агенты — модели поведения, контекста и угроз — взаимодействуют в режиме онлайн, формируя коллективную оценку риска. Важным направлением остаётся автоматизация этического и юридического аудита, включая фиксацию действий и политики обработки персональных данных через смарт-контракты и распределённые реестры. Предложенный подход формирует основу для ответственного применения аналитики поведения, сочетая техническую эффективность, прозрачность принятия решений и соответствие этико-правовым нормам.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Artioli, A. Maci, A. Magrì, A comprehensive investigation of clustering algorithms for User and Entity Behavior Analytics // Frontiers in Big Data. — vol. 7, 2024. — Art. № 1375818.
2. M.M. Auer and M.D. Griffiths, The use of personalized behavioral feedback for online gamblers: an empirical study // Frontiers in Psychology. — vol. 6, 2015. — Art. № 1406.
3. M.Y.S. Bak et al., The use of automated data collection in applied behavior analytic research: A systematic review // Behavior Analysis: Research and Practice. — vol. 21, № 4, 2021. — pp. 376-392.
4. G. Gavai et al., Supervised, and unsupervised methods to detect insider threat from enterprise social and online activity data // Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications. — vol. 6, № 4, 2015. — pp. 47-63.
5. D. Godoy and A. Amandi, A conceptual clustering approach for user profiling in personal information agents // AI Communications. — vol. 19, № 3, 2006. — pp. 207–227.
6. G. González-Granadillo, S. González-Zarzosa, and R. Diaz, Security information and event management (SIEM): Analysis, trends, and usage in critical infrastructures // Sensors. — vol. 21, № 14, 2021. — Art. № 4759.
7. S. Khaliq, Z.U.A. Tariq, and A. Masood, Role of user and entity behavior analytics in detecting insider attacks // Proc. 2020 Int. Conf. Cyber Warfare and Security (ICCWS), 2020. — pp. 1–6.
8. M.Z.A. Khan, M.M. Khan, and J. Arshad, Anomaly detection and enterprise security using user and entity behavior analytics (UEBA) // Proc. 2022 3rd Int. Conf. Innovations in Computer Science & Software Engineering (ICONICS), 2022. — pp. 1–9.
9. H.R. Kwon and E.A. Silva, Mapping the landscape of behavioral theories: Systematic literature review // Journal of Planning Literature. — vol. 35, № 2, 2020. — pp. 161–179.
10. A.G. Martín et al., A survey for user behavior analysis based on machine learning techniques: Current models and applications // Applied Intelligence. — vol. 51, № 8, 2021. — pp. 6029–6055.
11. M.A. Salitin and A.H. Zolait, The role of User Entity Behavior Analytics to detect network attacks in real time // Proc. 2018 Int. Conf. Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT), 2018. — pp. 1–5.
12. H. Sharma, Behavioral analytics and zero trust // International Journal of Computer Engineering and Technology. — vol. 12, № 1, 2021. — pp. 63–84.
13. M. Shashanka, M.-Y. Shen, and J. Wang, User, and entity behavior analytics for enterprise security // Proc. 2016 IEEE Int. Conf. Big Data (Big Data), 2016. — pp. 1867–1874.
14. R. Yousef and M. Jazzar, Measuring the effectiveness of user and entity behavior analytics for the prevention of insider threats // Journal of Xi'an University of Architecture & Technology. — vol. 13, 2021. — pp. 175–181.
15. T. Zhang, R. Ramakrishnan, and M. Livny, BIRCH: A new data clustering algorithm and its applications // Data Mining and Knowledge Discovery. — vol. 1, 1997. — pp. 141–182.
16. X. Zhang et al., Research and application of space-time behavior maps: A review // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. — vol. 20, № 5, 2021. — pp. 581–595.

© Раевская Наталья Александровна (1132247136@rudn.ru); Царегородцев Анатолий Валерьевич (tsaregorodtsev-av@rudn.ru);
Булекова Екатерина Владимировна (1132247139@pfur.ru); Усенко Елизавета Алексеевна (1132247142@pfur.ru);
Петрыкина Анастасия Денисовна (1132247134@pfur.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.38

СМЕЩЕНИЯ В МУЗЫКАЛЬНЫХ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ: ОБЗОР, ФОРМАЛИЗАЦИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ И МЕТОДЫ ДЕБАЙСИНГА

BIASES IN MUSICAL RECOMMENDER SYSTEMS: SURVEY, FORMALIZATION, CLASSIFICATION AND DEBIASING METHODS

N. Seniatkin

Summary. The paper provides a structured systematization of biases inherent to recommender systems with aim to musical domain. The survey introduces an integrated taxonomy that captures both general algorithmic distortions and domain-specific effects characteristic of the music industry. The study formulates the core objective of consolidating fragmented knowledge about data-driven, algorithmic, and socio-contextual biases into a unified analytical framework. It identifies key distortions observed in practice, including popularity, exposure, and position biases, as well as genre, cultural, gender, and label-related inequalities amplified by feedback loops and repetitive content consumption behavior. The work formalizes these phenomena using quantitative measures such as popularity and diversity indicators, exposure and fairness-oriented metrics, and bias amplification coefficients. It further classifies mitigation strategies applied at the stages of data preprocessing, model training, and post-ranking adjustment, emphasizing the need for domain adaptation due to the strong impact of playlists, seasonal trends, and structural asymmetries between artists. The results establish a methodological foundation for evaluating fairness in music recommendation and outline research prospects, including the development of domain-specific metrics, datasets enrichment, and frameworks that find fairness balance between users and artists interests.

Keyword: recommender systems, music streaming, music recommender systems, machine learning, data bias, bias evaluation, genre bias, specific bias, debiasing.

Сеняткин Никита Станиславович
аспирант, Российская Академия Народного Хозяйства и Государственной Службы при Президенте РФ, г. Москва
719042427@telegram.wappi

Аннотация. Статья посвящена систематизации смещений, возникающих в рекомендательных системах, особый упор сделан на домен музыкальных рекомендательных систем. В работе предлагается единая таксономия, учитывающая как общие для рекомендательных алгоритмов искажения, так и доменные особенности музыкальной индустрии. Сформулирована исследовательская задача — объединить разрозненные знания о смещениях в данных, алгоритмах и социальном контексте в структурированную модель. В работе представлены ключевые типы искажений, включая популярностные, экспозиционные и позиционные смещения, а также жанровые, культурные, гендерные и лейбловые перекосы, усиленные эффектами обратной связи и характером повторного потребления. Описаны и структурированы метрики, позволяющие формализовать эти явления: показатели популярности и разнообразия, метрики экспозиции, справедливости и усиления смещений. Систематизированы методы смягчения смещений на этапах подготовки данных, обучения моделей и переранжирования выдачи. Показано, что в музыкальном домене классические подходы требуют адаптации из-за высокой повторяемости потребления, влияния плейлистов и асимметрии между артистами. Полученные результаты формируют основу для разработки справедливых музыкальных рекомендаций и определяют направления дальнейших исследований, связанных с метриками, датасетами и учетом интересов разных сторон экосистемы.

Ключевые слова: рекомендательные системы, обзор, музыкальные сервисы, музыкальные рекомендательные системы, смещения данных, машинное обучение, специфичные смещения, дебайсинг.

Введение

Развитие музыкальных стриминговых платформ радикально изменило способы потребления музыки. Сервисы вроде *Spotify, Apple Music* «ВК Музыка» и «Яндекс Музыка» формируют значительную часть музыкального трафика, а персонализированные рекомендательные системы (РС) стали главным инструментом навигации по контенту [1]. Такие системы упрощают пользователям поиск музыки, но одновременно оказывают влияние на их вкусы, определяя, какие исполнители и жанры получают наибольшую видимость и внимание [2; 3].

Опыт исследователей и индустриальных инженеров за последние годы показал, что рекомендательные системы подвержены множественным смещениям *(bias),* возникающим не только на технических этапах рекомендаций, таких как сбор данных, кандидатогенерация, ранжирование, но и на административных этапах (взаимодействие с лейблами). Наиболее часто встречающиеся в исследованиях смещения включают в себя смещения популярности *(Popularity bias)*, экспозиции *(Exposure bias)*, позиции *(Positional bias)*, а также эффекты обратной связи (Feedback loop) и социального влияния *(Social bias)* [4–7]. Игнорирование данных смещений влечет за собой риски того, что рекомендательные системы будут наибо-

лее часто рекомендовать популярные объекты, а также ограничивать разнообразие рекомендаций, заворачивая вкусы пользователей «в пузырь», снижая шансы менее известных, но потенциально релевантных рекомендаций, попасть в рекомендации широкой аудитории [8].

Каждая доменная область рекомендательных систем имеет свои уникальные особенности, музыкальные рекомендации не исключение. Музыка характеризуется высокой степенью повторного потребления, сильным влиянием редакторских и пользовательских плейлистов, ярко выраженной сезонностью и жанрово-культурными различиями. В результате здесь проявляются специфические виды смещений: смещение при попадании в плейлист — смещение рекомендательной системы, характеризующееся многократным увеличением вероятности рекомендации треков, которые попали в крупный плейлист [9]; жанровое и культурное смещение, выражающееся в недопредставленности нишевых жанров, особо характерных определенной культуре [1]; смещение по автору/метаданным— смещение, при котором пол артиста, его популярность, лейбл определяют его представленность среди рекомендованных треков [3;10]; временное смещение, отражающее зависимость от краткосрочных трендов и сезонных хитов [2].

В процессе изучения представленных научных работ было замечено, что в исследовательском поле нет трудов, посвященных систематизации знаний в области смещений музыкальных рекомендательных систем, было решено собрать и обобщить накопленные труды в области смещений, учитывая специфику музыкальной области. Настоящая статья ставит целями:

1. провести обзор известных смещений в рекомендательных системах и методов их анализа;
2. выделить и классифицировать уникальные смещения, характерные для музыкальных сервисов;
3. предложить таксономию смещений, объединяющую общие и специфические для музыки проявления.

Актуальность работы заключается в создании уникальной для музыкальных рекомендательных систем таксономии смещений, объединяющей общие и специфичные для музыкального контекста смещения. В отличие от существующих подходов, где упор делается в основном на популярность или экспозицию, мы выделили:

- жанровые и стилистические перекосы;
- гендерный дисбаланс среди исполнителей;
- лейбловую асимметрию (доминирование крупных компаний);
- региональные и культурные различия.

Основной вклад исследования заключается в систематизации накопленных знаний о смещениях в музыкальной индустрии, введении уникальной классификации смещений, ориентированной на музыкальные рекомендательные системы. Данный обзор представляет агрегированные знания касаемо основных смещений в музыкальных рекомендательных системах, облегчая работу для исследователей и практиков в области решения задач оценки справедливости рекомендаций, а также в области разработки методов дебайсинга, учитывающих специфику музыкальной индустрии. Исследование открывает возможность систематического анализа именно музыкальных РС, что ранее было предметом лишь отдельных исследований.

Смещения в рекомендательных системах

Общие смещения в рекомендательных системах

Проблема смещений в рекомендательных системах стала активно изучаться в последние годы, что отражено в ряде обзорных работ [6; 8]. Под смещением понимаются систематические искажения в данных или в алгоритмах, которые приводят к несправедливому или неравномерному распределению рекомендаций.

Наиболее изученным является смещение популярности (*popularity bias*) — тенденция рекомендательных алгоритмов усиливать видимость уже популярных объектов [8; 11]. Оно связано с так называемым эффектом Матфея («богатые становятся богаче»), когда известные элементы продолжают накапливать внимание пользователей [5].

Экспозиционное смещение *(exposure bias)* отражает тот факт, что пользователи могут не взаимодействовать с объектами просто потому, что они не были показаны в выдаче [6]. Близкое явление — позиционное смещение (*position bias*), когда вероятность выбора элемента зависит от его позиции в списке.

Особое внимание уделяется смещению отбора *(selection bias)*: поведенческие данные отражают лишь выбор подмножеств контента, что приводит к искажению модели предпочтений [4].

Ключевую роль играет петля обратной связи *(feedback loop bias)*: модель обучается в том числе на данных, которые были ею предложены, усиливая уже существующие тенденции [5]. Это ведет к гомогенизации пользовательского опыта и снижению разнообразия.

Также активно исследуется смещение социального влияния *(social influence bias)* — склонность пользователей корректировать оценки и выборы в зависимости от оценок других [7].

Таким образом, современные работы выделяют широкий спектр смещений: популярности, экспозиции,

позиции, отбора, социального влияния, а также их комбинации. Изобретено множество различных методов дебайсинга, включая перебалансировку данных, каузальные модели и переранжирование [6].

Смещения, специфичные для музыкальных рекомендательных систем

В музыкальной индустрии смещения приобретают дополнительные черты, связанные с особенностями потребления и производства контента. Ряд исследований обращает внимание на то, что музыка отличается высокой кратностью прослушиваний, влиянием плейлистов и доминированием крупных лейблов и артистов [1; 9; 10].

Смещение плейлистов *(playlist bias)*. Попадание трека в популярный плейлист значительно увеличивает вероятность его дальнейшего продвижения системой [9]. Поэтому одним из действующих и эффективных способов продвижения трека в рекомендательной системе является его попадание в крупные плейлисты.

Жанрово-культурное смещение *(genre & cultural bias)*. Исследования фиксируют недопредставленность нишевых и этнических жанров в рекомендациях [1]. Особенно сильно это выражается на небольших жанрах, характерных для небольших этнических групп. Это приводит к культурному неравенству, размытию границ между культурами, а также к снижению разнообразия музыкального опыта. Международные сервисы наиболее сильно подвержены данному типу смещений.

Смещение по артистам и метаданным *(artist/metadata bias)*. Работа *Shakespeare D*. и соавт. [3] показывают значительный гендерный перекос: алгоритмы чаще рекомендуют треки артистов мужского пола. Помимо гендерного перекоса, на прослушиваемость трека влияет отношение автора к лейблу. Исследование Knees и соавт. [10] показывает, что крупные лейблы играют важнейшую роль в представленности артиста в музыкальном сервисе.

Временные смещения *(temporal bias)*. Музыкальные тренды характеризуются сезонными пиками (например, новогодние песни), которые алгоритмы усиливают, снижая представленность стабильного контента [2]. Существует риск попадания сезонного популярного контента в рекомендации нишевых пользователей, что может способствовать их оттоку из сервиса.

Помимо уникальных смещений, ряд общих смещений имеет чрезмерное влияние на музыкальные РС. Петля обратной связи. Концепция традиционных рекомендательных систем редко подразумевает рекомендации объектов, с которыми пользователь уже взаимодействовал, однако концепция потребления музыкального контента основана на частых повторных прослушиваниях понравившихся треков, поэтому рекомендации уже знакомых треков в музыкальной индустрии поощряются, в связи с этим, модели сильно подвержены снижать разнообразие рекомендаций и предлагать уже устоявшиеся для пользователя треки, делая разнообразие рекомендаций крайне низким.

Петля обратной связи в музыкальных рекомендациях является предпосылкой к возникновению следующих двух смещений:

1. перепредставленность в рекомендациях *(Overexposure Bias)* — пользователю предлагаются одни и те же треки или артисты слишком часто, что приводит к усталости или раздражению.
2. «застой» в рекомендациях *(Recommendation Staleness)* — более сильная форма перепредставленности, характеризующаяся систематическими рекомендациями одного и того же. Иногда этот эффект даже имеет определенный паттерн — пользователю рекомендуется с определенной периодичностью список одних и тех же треков практически в том же порядке. В связи с этим, пользователь выучивает рекомендации, что негативно влияет на его опыте работы с системой.

Обобщая вышесказанное, музыкальные рекомендательные системы подвержены уникальным искажениям. Именно это обосновывает необходимость предложенной в работе новой классификации смещений, ориентированной на специфику музыкальной области.

Метрики оценки смещений

Измерение смещений в рекомендательных системах требует введения статистических показателей, отражающих искажения в распределении рекомендаций. В литературе предложен широкий спектр метрик, которые можно разделить на три группы:

1. метрики популярности и разнообразия;
2. метрики экспозиции и справедливости;
3. метрики усиления смещений.

Метрики популярности и разнообразия

Для оценки того, насколько рекомендации склоняются к уже популярным объектам, применяют простые и интерпретируемые метрики.

Доля популярного контента. Показывает среднюю долю «популярных» объектов в выдаче:

$$PR = \frac{1}{|U|}\sum_{u\in U}\frac{|L_u \cap P|}{|L_u|}, \quad (1)$$

где L_u — топ-k рекомендаций для пользователя u, P — предопределенное множество популярного контента (например, верхние 1 % по просмотрам).

Разнообразие. Показывает, насколько сильно разнообразны рекомендации. Один из популярных подходов — использование эмбеддингов объектов и расчет сходства между ними. Одна из таких метрик — *Intra List Similarity* (ILS) [12]. Данная метрика оценивает попарную схожесть между рекомендуемыми объектами.

$$ILS(R) = \frac{1}{|R|(|R|-1)} \sum_{i \in R} \sum_{j \in R, j \neq i} sim(i,j) \qquad (2),$$

где R — список рекомендованных элементов, $|R|$ — его длина, а $sim(i,j)$ — мера сходства между элементами i и j.

Коэффициент Джини. Широко используется для измерения концентрации (неравномерности) распределения внимания между объектами [13]. Пусть x_i — число взаимодействий для объекта i, $i = 1,\ldots,n$. Тогда

$$G = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} |x_i - x_j|}{2n \sum_{i=1}^{n} x_i} \qquad (3)$$

Значение G находится в интервале $[0,1]$: $G = 0$ соответствует полному равенству (все объекты имеют одинаковую долю в выдаче рекомендательной системы), а $G \to 1$ — сильной концентрации на небольшом числе объектов.

Энтропия Шеннона. Для оценки разнообразия выдачи полезно вычислять энтропию распределения появления объектов [14]:

$$H = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log p_i \qquad (4)$$

где p_i — эмпирическая вероятность появления объекта i в рекомендованных списках. Энтропия чувствительна к числу возможных объектов и к тому, насколько равномерно распределены их вероятности.

Покрытие длинного хвоста *(Long-tail Coverage)*.

$$LTC = \frac{|L_{tail} \cap R|}{|L_{tail}|} \qquad (5)$$

где L_{tail} — множество объектов «длинного хвоста» (объектов, имеющих небольшую популярность), R — множество всех рекомендованных объектов.

Метрики экспозиции и справедливости

Эти метрики позволяют оценить, какой объект получает внимание, и насколько распределение экспозиции согласуется с релевантностью [15].

Средняя экспозиция.

$$E(i) = \frac{1}{|U|} \sum_{u \in U} I[i \in L_u] \qquad (6)$$

где $I[i \in L_u]$ — индикатор попадания объекта i в выдачу для пользователя u.

Разность экспозиции. Для сравнения двух групп объектов (позволяет оценить разницу экспозиции между двумя группами объектов) используют:

$$ED = \frac{E(G_1)}{|G_1|} - \frac{E(G_2)}{|G_2|} \qquad (7)$$

где $E(G)$ — суммарная экспозиция группы G, а $|G|$ — размер группы.

Метрики оценки усиления смещений

Важнейшие метрики для анализа смещений, вызванных самим рекомендательным алгоритмом, позволяющие сравнить между собой «органические» взаимодействия пользователей и взаимодействия пользователей с рекомендуемыми объектами. Данная группа метрик направлена на выявление различного рода смещений, которые провоцируются самим рекомендательным алгоритмом.

Коэффициент усиления *(Amplification Factor, AF)*.

$$AF = \frac{Bias_{rec}}{Bias_{data}} \qquad (9)$$

где $Bias_{data}$ — выбранная метрика смещения в исходных логах (например, Gini по прослушиваниям), а $Bias_{rec}$ — та же метрика, вычисленная по рекомендованным спискам. Значение $AF > 1$ указывает на усиление смещения алгоритмом.

Усиление популярного *(Popularity Lift)*. Разница в вероятности появления популярного объекта в рекомендациях и в данных:

$$PL = P_{rec}(i \in P) - P_{data}(i \in P) \qquad (10)$$

Неравенство представленности *(Bias Disparity)*. Разница в представленности одних и тех же объектов рекомендаций в обучающем наборе данных и в тестовом наборе данных. Bias Disparity:

$$BD = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \left| \frac{|I_g^{train}|}{|I^{train}|} - \frac{|I_g^{test}|}{|I^{test}|} \right| \qquad (11)$$

где I_g — объекты группы g.

Сильный перекос по данной метрике указывает на выраженный дисбаланс между обучающими данными и данными, на которых модель будет работать.

Приведенные метрики позволяют формализовать как общие смещения (например, популярности), так и специфические для музыкальных систем (например, различия в экспозиции артистов разных жанров или полов). Использование этих показателей обеспечивает количественную основу для анализа и последующего дебайсинга рекомендательных моделей.

Классификация смещений в музыкальных рекомендательных системах

Существующие классификации смещений в рекомендательных системах, представленные в работах [6; 8; 16], в основном охватывают общие категории — популярности, экспозиции, позиции и социального влияния. Однако специфика музыкальных платформ приводит к возникновению уникальных, контент-зависимых и контекст-зависимых смещений.

Музыка имеет уникальный паттерн потребления, скорость ее потребления сильно выше, чем в других сферах, а большое количество перепрослушиваний одного и того же — ее характерная черта. Более того, смещения в музыкальных рекомендательных системах имеют более сложную структуру: они связаны не только с пользовательским поведением, но и с особенностями самой индустрии — наличием крупных лейблов, жанровой сегрегацией и временной динамикой популярности.

На основании анализа литературы [1; 3; 5; 9; 10] предлагается расширенная таксономия смещений, объединяющая общие и специфические для музыкальных систем проявления.

Предложенная классификация объединяет 10 ключевых типов смещений, сгруппированных по их источникам и механизму проявления (таб. 1). Она позволяет различать:

- смещения, зависимые от данных *(selection, popularity, exposure, playlist)*;
- алгоритмические смещения *(position, feedback loop)*;
- социально-контекстные смещения *(social influence, genre/cultural, artist/metadata, temporal)*.

Таким образом, предложенная таксономия формализует смещения, которые возникают в рекомендательных системах, а также является фундаментом для анализа смещений в музыкальных рекомендательных системах.

Методы устранения и смягчения смещений

Методы снижения влияния смещений можно разделить на три класса в зависимости от этапа вмешательства: предобработка данных, обучение алгоритмов и переранжирование.

Таблица 1.

Классификация смещений в музыкальных рекомендательных системах

Уровень	Тип смещения	Проявление в музыкальных РС	Ключевые метрики
Данные	*Popularity bias*	Усиление доминирования популярных треков и артистов в выдачи.	*Gini* (3), *Popularity share* (1)
Данные	*Selection bias*	Поведенческие логи отражают лишь часть реальных предпочтений.	*Bias Disparity* (11), *IPS*-параметры
Данные	*Feedback loop bias*	Рекомендательный цикл усиливает уже рекомендованные объекты.	*Amplification Factor* (9), *Popularity Lift* (10), *time-based ED* (7)
Алгоритмы	*Exposure bias, Overexposure bias*	Контент получает чересчур неравномерное внимание со стороны системы.	*E(i)* (6)
Алгоритмы	*Position bias*	Верхние позиции в выдаче получают несоразмерное количество кликов.	*PBM* (12), *CTR@p*
Алгоритмы	*Recommendation Staleness*	Систематические рекомендации одного и того же.	*ILS by user* (2), *Time-based User's ED* (7)
Социальные явления	*Genre bias*	Недопредставленность нишевых и локальных жанров.	*Entropy* (4), *LTC* (5)
Социальные явления	*Artist gender bias*	Неравное распределение в выдаче между артистами разных полов.	*Exposure Disparity* (7)
Социальные явления	*Label bias*	Крупные лейблы получают преимущество в экспозиции.	*Exposure per label, ED* (7)
Социальные явления	*Language / Regional / Cultural bias*	Доминирует язык и культура крупнейшей группы слушателей.	*Share by language / region*

Предобработка направлена на коррекцию исходных данных и включает балансировку выборки, корректировку экспозиции (например, IPS-подходы), аугментацию данных для новых релизов и фильтрацию рекомендательных логов. В музыкальной индустрии на практике чаще всего применяются фильтрация данных и корректировка экспозиции с приоритетом органических взаимодействий.

На уровне **алгоритмов** используются регуляризации, штрафы за неравномерную экспозицию и мультиобъектная оптимизация, учитывающая компромисс между точностью и разнообразием. Отдельное направление связано с обучением моделей на отклонениях от средних значений например (biased — коллаборативные фильтрации), что позволяет частично снижать эффекты экспозиционного смещения и застоя.

Переранжирование применяется на финальном этапе и основано на бизнес-правилах и ограничениях на разнообразие. Наиболее распространены квотирование тех или иных категорий и жанрово-артистические ограничения, позволяющие повысить разнообразие рекомендаций при контролируемом снижении точности.

Каждый класс вышеуказанных методов имеет практические **ограничения**: предобработка требует доступа к избычной детализации данных, содержание которой требует огромного количества памяти, обучение — модификации моделей и дополнительных вычислительных ресурсов, а переранжирование может снижать релевантность рекомендаций. В реальных системах методы обычно комбинируются с учётом архитектурных и бизнес-ограничений.

Перспективы исследований

Анализ показывает, что существующие работы ограничены недостаточной адаптацией метрик к музыкальному домену, ограниченностью публичных датасетов и фокусом преимущественно на стороне пользователя, а не артиста. Перспективными направлениями являются разработка доменно-специфичных метрик справедливости, сбор более богатых музыкальных датасетов, исследование двусторонней справедливости и учёт мультикультурного контекста рекомендаций.

Заключение

В работе рассмотрены основные типы смещений в рекомендательных системах и предложена их классификация, объединяющая общие и музыкально-специфичные факторы. Показано, что музыкальный контекст усиливает эффекты петли обратной связи, застоя и неравномерной представленности артистов и жанров. Предложенный обзор и систематизация создают основу для разработки методов и метрик, ориентированных на справедливость и разнообразие в музыкальных рекомендациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hesmondhalgh D. et al. The impact of algorithmically driven recommendation systems on music consumption and production: a literature review //UK Centre for Data Ethics and Innovation Reports. — 2023.
2. Ferraro A., Serra X., Bauer C. What is fair? Exploring the artists' perspective on the fairness of music streaming platforms //IFIP conference on human-computer interaction. — Cham: Springer International Publishing, 2021. — С. 562–584.
3. Shakespeare D. et al. Exploring artist gender bias in music recommendation //arXiv preprint arXiv:2009.01715. — 2020.
4. Tsintzou V., Pitoura E., Tsaparas P. Bias disparity in recommendation systems //arXiv preprint arXiv:1811.01461. — 2018.
5. Mansoury M. et al. Feedback loop and bias amplification in recommender systems//Proceedings of the 29th ACM international conference on information and knowledge management. — 2020. — С. 2145–2148.
6. Chen J. et al. Bias and debias in recommender system: A survey and future directions //ACM Transactions on Information Systems. — 2023. — Т. 41. — №. 3. — С. 1–39.
7. Krishnan S. et al. A methodology for learning, analyzing, and mitigating social influence bias in recommender systems //Proceedings of the 8th ACM Conference on Recommender systems. — 2014. — С. 137–144.
8. Klimashevskaia A. et al. A survey on popularity bias in recommender systems //User Modeling and User-Adapted Interaction. — 2024. — Т. 34. — №. 5. — С. 1777–1834.
9. Ferraro A. et al. Artist and style exposure bias in collaborative filtering-based music recommendations //arXiv preprint arXiv:1911.04827. — 2019.
10. Knees P., Ferraro A., H¨ubler M. Bias and feedback loops in music recommendation: Studies on record label impact // — CEUR-WS. org, 2022. — Т. 3268.
11. Kowald D., Schedl M., Lex E. The unfairness of popularity bias in music recommendation: A reproducibility study //European conference on information retrieval. — Cham: Springer International Publishing, 2020. — С. 35–42.
12. Jesse M., Bauer C., Jannach D. Intra-list similarity and human diversity perceptions of recommendations: the details matter: M. Jesse et al //User Modeling and User-Adapted Interaction. — 2023. — Т. 33. — №. 4. — С. 769–802.
13. Do V., Usunier N. Optimizing generalized Gini indices for fairness in rankings //Proceedings of the 45th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. — 2022. — С. 737–747.
14. Punetha N., Jain G. Integrated Shannon entropy and COPRAS optimal model-based recommendation framework //Evolutionary Intelligence. — 2024. — Т. 17. — №. 1. — С. 385–397.
15. Singh A., Joachims T. Fairness of exposure in rankings //Proceedings of the 24th ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining. — 2018. — С. 2219–2228.
16. Burke R. Multisided fairness for recommendation //arXiv preprint arXiv:1707.00093. — 2017.

© Сеняткин Никита Станиславович (719042427@telegram.wappi)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.40

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

Таран Василий Васильевич
кандидат культурологии,
Лаборатория компьютерного дизайна
и прикладной информатики SPLASHLab
allscience@lenta.ru

Аннотация. В статье рассматриваются аспекты программно-генеративных взаимосвязей библиотек-*расширений* «cell-aut.lsp» и «pianosyn.lsp» (в контексте фрагмента «piano-note») языка программирования Nyquist с точки зрения технико-функционального анализа для повышения эффективности процедур имитационного моделирования аудиосигналов, а также для составления алгоритмически-комбинаторных композиций. Расшифрованы основные детали программного кода библиотеки-*расширения* «cell-aut.lsp» во взаимосвязи её функций с фрагментом библиотеки «pianosyn.lsp», отвечающей за синтез звуков фортепиано с имитационным моделированием различных метрико-акустических характеристик. В качестве механизма для получения новой фактуры полифонико-синтетических аудиоматериалов был выбран принцип клеточных автоматов. За основу модели, определяющей структурную топологию поведений элементарных клеточных автоматов, были взяты два *правила* Вольфрама 35 и 95. Раскрыты и на экспериментальной основе уточнены базовые свойства топологии поведения клеток (*ячеек*) на холсте клеточного автомата по определённым в настоящем исследовании *правилам* Вольфрама при получении новых синтезируемых образцов синтетических аудиокомпозиций. Получены новые экспериментальные результаты в области алгоритмизации и аудиопрограммирования, способствующие приращению новых инженерных и научных знаний в области аудиоинформатики и компьютерных наук. В заключении сформулированы итоги проведённого автором исследования.

Ключевые слова: язык программирования Nyquist, NyquistIDE, аудиопрограммирование, аудиоинформатика, компьютерные науки, параллельные вычисления, аудиосинтез, имитационное моделирование, алгоритмически-комбинаторные аудиосигналы, генеративные взаимосвязи, клеточные автоматы, *правила* Вольфрама — «35/95», библиотеки-*расширения* — «cell-aut.lsp» и «pianosyn.lsp (функция piano note)».

TECHNICAL AND FUNCTIONAL ANALYSIS OF THE GENERATIVE INTERRELATIONS OF THE LIBRARIES-EXTENSIONS «CELL-AUT.LSP» AND «PIANOSYN.LSP — PIANO-NOTE» OF THE NYQUIST PROGRAMMING LANGUAGE WITHIN THE SYSTEM OF IMITATION MODELING OF ALGORITHMIC-COMBINING AUDIO SIGNALS USING THE CELLULAR AUTOMATA PRINCIPLE

V. Taran

Summary. This paper examines the aspects of programmatically generated interrelations between the extension libraries «cell-aut.lsp» and «pianosyn.lsp» (within the context of the «piano-note» fragment) of the Nyquist programming language from the perspective of technical and functional analysis. The goal is to enhance the efficiency of procedures for imitation modeling of audio signals and to facilitate the development of algorithmically combinatorial compositions. Key details of the source code of the «cell-aut.lsp» extension library are decoded, revealing its functional relationship with the «pianosyn.lsp» library fragment, which is responsible for piano sound synthesis with imitation modeling of various metrical and acoustic characteristics. The cellular automata principle was adopted as the mechanism for generating new textures of polyphonic synthetic audio materials. The model, which defines the structural topology of the behaviors of elementary cellular automata, is based on two Wolfram rules: 35 and 95. The fundamental properties of cell behavior topology on the cellular automaton grid, according to the specific Wolfram rules, are elucidated and experimentally refined during the synthesis of new synthetic audio samples. New experimental results have been obtained in the fields of algorithmization and audio programming, contributing to the advancement of engineering and scientific knowledge in audio informatics and computer science. The paper concludes with a summary of the research conducted by the author.

Keywords: nyquist programming language, NyquistIDE, audio programming, audio informatics, computer science, parallel computing, sound synthesis, imitation modeling, algorithmically combinatorial audio signals, generative interrelations, cellular automata, Wolfram rules — «35/95, extension libraries — «cell-aut.lsp» and «pianosyn.lsp (piano note function)».

Пакет языка программирования Nyquist содержит необходимое количество библиотек-*расширений*, функционально обогащающих практику инженерной обработки, управления и программирования звука. Выбранная инженерами-проектировщиками тактика к реализации пакета NyquistIDE (Nyquist Integrated Development Environment) объясняется прежде всего тем, что технические манипуляции в сфере модификации аудиоматериалов, имеющих сложную неоднородную структуру, требуют определённой специфики подхода, так как такой тип аудиоматериала, в отличие от своего однородного аналога, имеет смешанные мультичастотные акустические характеристики, усложняющие процедуры цифрового многозадачного аудиопроцессинга [1]. Пакет NyquistIDE имеет программно-технические связи с редактором Audacity®, что по средствам *приглашения* позволяет запускать код на языке Nyquist внутри архитектуры данного редактора [2]. Эта опция позволяет вести инженерное редактирование звука программным путём с возможностью его дальнейшей визуальной интерпретации [3]. Концептуально это хорошо вписывается в бурно растущее технологическое развитие Всемирной паутины, поскольку в будущем традиционные программы всё сильнее и сильнее будут интегрированы в WEB-оболочку [4]. Известно, что классические библиотеки и библиотеки-*расширения*[1] в языках программирования играют *существенную* вспомогательную роль при построении различных архитектур программного обеспечения разноформатной направленности. Nyquist в этой связи не является исключением, его библиотеки призваны снизить нагрузку на разработчика (оператора рабочей станции, компьютера) при формировании прототипов, предполагающих повторяющиеся (*циклические*) операции, имеющие рутинные свойства. В этой статье речь пойдёт о библиотеках-*расширениях* cellaut.lsp и pianosyn.lsp, которые в контексте применения клеточных автоматов направлены на обеспечение утилитарных генеративных функций при решении задач, затрагивающих различные аспекты организационно-технической деятельности по производству новых *уникальных* фактур аудиоматериалов и инновационных методов аудиоисинтеза. Автор продолжает анализировать и экспериментировать на тему применения *правил* Вольфрама (Wolfram rules) для построения различных топологий поведения клеточных автоматов. Такой анализ необходим для расширения *теоретической* и *прикладной* исследовательской базы *аудиоинформатики*, а также для внедрения передовых практик инженерной обработки аудиоматериалов в обиход специалистов, занимающихся *аудиоинженерией* и инновационными техниками разработки специальных компьютерных программ [5,6,7,8,9,10,11,12]. В качестве модели генеративных алгоритмов[2] выбраны *правила* 35 и 95 с возможностью их базовой реализации в LISP-структуре [13,14]. LISP-структура универсальна для исполнения неявных команд внутри тела программы, так как Nyquist является её частью (диалектом), поэтому справедливо отметить, что *интерпретация* указанных *функций*[3] может быть также важна и для других проектов[4] [15,16,17,18,19]. Эти модели призваны продемонстрировать получение уникальных образцов аудиоматериала и могут быть использованы в качестве программных прототипов для составления различных алгоритмических конструкций

[1] Прим. автора. Библиотеки-***расширения*** (в информатике) — это составная часть концепции языков программирования. Они предназначены для многократного воспроизведения ряда технологических операций, опционально направленных на выполнение рутинных задач и предусматривают заранее заготовленные инструменты для осуществления циклов и адаптации внутрикодовой нотации при написании программ со сложной архитектурой. Привязка «***расширения***» означает, что та или иная библиотека языка программирования, соответствующая конкретному профилю решения задач, содержит более глубокие структуры кода, не присутствующие в оригинальной схеме и нотационной разметке любого программно-лексического средства. Такие расширения наполняют языки программирования дополнительным инструментарием, как правило, необходимым для оптимизации логических взаимосвязей кодовой нотации и различных итерационных последовательностей. Строго говоря, библиотеки нужны для упрощения выполнения определённых задач, с возможностью добавления новых функций или интеграции сторонних технологий в ту или иную программно-языковую среду (по определению автора, В.В. Таран — 2026.).

[2] Прим.автора. Генеративные алгоритмы — это специальный тип алгоритмов, предназначенных для создания новых данных, структурных комбинаций, объектов или решений на основе заданных правил, логических моделей или обучения. Такой тип алгоритмов, как правило, использует определённые параметры статистических и обученных моделей, с целью автоматического генерирования новых структур, таких как звуки, изображения, тексты и другие виды данных (по определению автора, В.В. Таран — 2026.).

[3] Прим.автора. Интерпретация функций в LISP — это процесс определения значения функции при её вызове и выполнении соответствующих вычислений. В LISP интерпретация включает в себя поведение программной схемотехники, а также выполнение выражений, где функции могут быть определены пользователем или встроены в структуру языка. Это позволяет LISP работать с ***динамической типизацией*** и возможностью обработки кода как данных, что делает его мощным инструментом для разработки и исследования различных программных архитектур (по определению автора, В.В. Таран — 2026.).

[4] Прим.автора. Универсальность проектов на LISP — это способность данного языка адаптироваться к различным задачам и областям имитационной деятельности благодаря разнообразию его диалектов. LISP обладает гибкостью, позволяющей использовать его для искусственного интеллекта, обработки сложных данных, разработки программных систем, автоматизации и многих других сфер. Его мощная концепция обработки кода как данных (***гомогенность***) и богатая поддержка ***метапрограммирования*** делают LISP ***универсальным*** инструментом, который можно ***настроить*** и ***расширить*** под ***конкретные потребности*** проекта в рамках различных диалектов, таких как Common Lisp, XLisp, Scheme, Nyquist и другие. При этом интерпретационная последовательность определения значения той или иной функции будет схожей, независимо от диалекта.

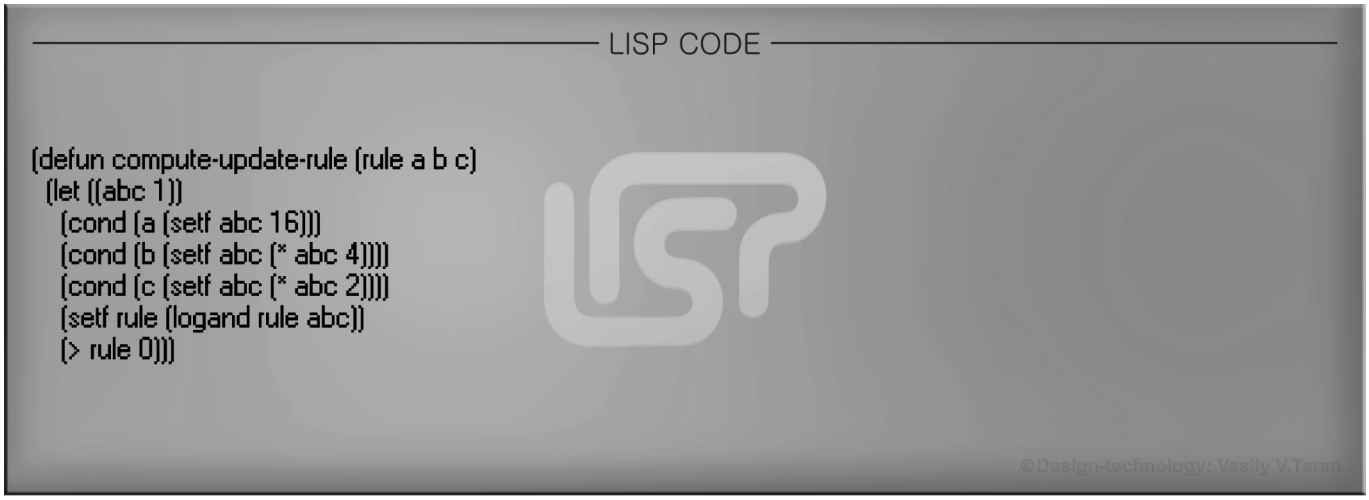


Рис. 1. Пролог, фрагмент кода функции cell-aut для генерации звуковых комбинаций на принципе клеточных автоматов (первичная логика обновления состояний ячеек, основанная на битовых масках)

и развития прикладного программирования в области научных исследований, связанных с аудиоинженерией [20].

Библиотеки-*расширения* cell-aut.lsp и pianosyn.lsp служат инструкциями для функционального отклика языка Nyquist. Чтобы глубже понять их работу, а также исследовать их опциональные функции, требуется провести технико-функциональный анализ[5] генеративных и программно-структурных взаимосвязей.

Для этого представим код функции cell-aut *фрагментарно*, с некоторыми пояснениями, а затем проанализируем её программную взаимосвязь с участком кода близкой по функционалу библиотеки pianosyn.lsp, отвечающего за воспроизведение различных метрико-акустических характеристик piano-note. Первый фрагмент — пролог программы, характеризующий *правило* обращения с битами (*битовыми масками*)[6] внутри библиотеки, рисунок №1.

Правило является восьмибитным (состоит из 8 *бит*). Здесь a, b, c используются для индексации битов *правила* и определения результата. Для этого необходима правильная позиция, например, если a = 0, b = 1, c = 1, то индекс равен 011 = 3, и нам нужен битовый шаблон с «1» в позиции 3: 00001000. Обратите внимание, что это 2 ^ 3 = a* 2 ^ 4 + b * 2 ^ 2 + c * 2 ^ 1.

Итак, мы можем проверить a, b, c и умножить на 16, 4, 2, чтобы получить правильную *последовательность* битов. Тогда эту же операцию мы можем сделать с помощью *правила*, чтобы в результате получить либо ноль, либо ненулевое значение. Расшифруем пролог *детальнее*:

Определение функции.

Имя функции: compute-update-rule

Аргументы: rule, a, b, c (все — *переменные*, передаваемые при вызове).

Локальная переменная.

В let создается локальная переменная abc, для которой по умолчанию присваивается значение «1».

Изменение abc в зависимости от *условий*:

cond — условная конструкция. Она проверяет усло-

[5] Прим.автора. Технико-функциональный анализ — это метод оценки (исследования) системы или объекта с точки зрения его ***технических*** характеристик, ***функциональных*** возможностей, структурных элементов и взаимосвязей между ними. Такой подход в научных исследованиях позволяет выявлять сильные и слабые стороны системы, определять её эффективность, надёжность и области для оптимизации или совершенствования. В контексте программных систем и технологий ***технико-функциональный анализ*** включает изучение архитектуры программного обеспечения, алгоритмов, закономерностей внутрикодовых операций, процедур верификации данных, интерфейсов, ресурсов и процессов, направленных на повышение производительности и качества работы компьютерных систем (по определению автора, В.В. Таран — 2026.).

[6] Прим.автора. Битовая маска — это число, в котором каждый бит (***битовая позиция, обращение с битами***) используется для хранения информации о каком-либо признаке или состоянии. Обычно битовая маска применяется для управления флагами, настройками или состояниями в программировании. Например, у нас есть 8 признаков, каждый из них можно представить одним битом в байте (8 бит). Значения 0 или 1 в отдельных битах показывают, включен ли признак или нет. Пример использования битовой маски: «00000001» — только первый признак включен, «00000101» — включены первый и третий признаки. Чтобы проверить, включен ли признак, используют побитовые «И» (&). Чтобы включить признак, используют побитовый «ИЛИ» (|). В области программирования это достаточно эффективный способ компактно хранить и обрабатывать множество булевых значений.

вие, и если оно истинно, выполняет соответствующий блок.

1.| (cond (a (setf abc 16)))[7]

[7] Прим.автора. В статье фрагменты программного кода библиотек-***расширений*** «cell-aut.lsp», «pianosyn.lsp (piano-note)» представлены без ***индентации****. Такой подход обусловлен ***удобством чтения кода*** в контексте обширных технико-функциональных (***текстовых***) комментариев. Фрагменты кода (***за исключением строк***) пронумерованы в целях оперативного обращения к тому или иному элементу языка программирования (литералы, переменные, списки, объявления, выражения, директивы, функции, процедуры и т.п.). Нумерация в структуре кода имеет специальный разделитель «|», позволяющий исключить ошибки при прочтении числовых массивов (целостность числовых массивов важна для осуществления операций счёта). Символ «–» — в ***комментариях***, обозначает строковой «***неразрывный***» пробел** (по Unicode U+00A0) присущий каждой строке в отдельности без автоматического переноса текста. Такое допущение необходимо для поддержания литературного стиля статьи. Символ «|#» — в комментариях, используется как начало блока комментариев, разделителя или метки для выделения определенного участка кода либо данных. Он служит маркером начала раздела комментария или примечания, это часть пользовательского стандарта — внутреннего соглашения. Символ введён для многострочных комментариев, таким образом «#|» — это начало комментария, а «|#» — его конец. Всё, что находится внутри #| ... |#, игнорируется интерпретатором. Следует помнить, что ***индентация*** в LISP не носит строго регламентированного характера и зависит от различных условностей построения кода, однако в некоторых диалектах её стоит придерживаться. В нашем случае код библиотеки-***расширения*** написан на диалекте LISP — (AutoLisp) с инкапсулированными вставками Common Lisp. Как и во многих других диалектах LISP хороший тон использования ***индентации*** равен 2-4 пробела для вложенных форм с левой стороны, но главное это сохранность скобочной структуры (она обязательна для всех диалектов LISP). В целях формирования удобочитаемости и разборчивости семантики LISP рекомендуем придерживаться следующих правил ***оформления*** кода:

1) Скобки должны располагаться в начале выражения.

2) Внутренние ***списки*** или ***вложенные выражения*** отступают вправо относительно ***родительского выражения***.

3) Обычно каждый элемент внутри ***списка*** пишется на ***новой строке*** с одинаковым уровнем отступа.

4) Величина отступа — обычно 2 или 4 пробела, в зависимости от стилевых рекомендаций или личных предпочтений программиста.

LISP является ***регистрозависимым*** языком. Это означает, что в нём различаются идентификаторы, написанные в верхнем и нижнем регистре. Например, переменные или функции с именами «foo», «Foo» и «FOO» считаются разными объектами. Для Common Lisp созданы некоторые инструменты форматирования (например, SLIME или SLY) которые подразумевают определённые правила оформления исполнимой символьной структуры в целях корректного ***парсинга*** кода. SLIME (Superior Lisp Interaction Mode for Emacs) — это специальный режим для Emacs, обеспечивающий глубокую интеграцию с различными LISP-реализациями. Он включает команду C-c C-f (или slime-format-defun), которая автоматически ***форматирует*** текущую функцию или выражение. Это большой плюс с точки зрения дизайна кода, так как: можно настраивать различные правила форматирования в автоматическом режиме, использовать стандартные правила LISP для отступов, обеспечить автоматическую расстановку скобок, отступов, произвести выравнивание элементов. SLY (Sylvester Lisp-y) — это аналог SLIME, также предназначен для Emacs, является современной модернизацией SLIME с расширенными функциями, имеет облегчённый и современный интерфейс, также позволяет форматировать код. Следует помнить, что при вводе закрывающей скобки или вызове команды TAB либо C-M-\ Emacs (по умолчанию) автоматически выравнивает текущее выражение. Если такой подход не срабатывает, применяем следующее выражение (define-key lisp-mode-map (kbd "TAB") ' indent-for-tab-command). Переменная lisp-indent-offset определяет размер отступа в LISP. По умолчанию — 2 пробела. Чтобы изменить на четыре пробела, применяем следующую конструкцию (setq lisp-indent-offset 2) → (setq lisp-indent-offset 2). Emacs — это мультифункциональный и настраиваемый текстовой редактор с богатой историей и большим сообществом пользователей. Он широко используется для программирования, редактирования текстов, написания сценариев и автоматизации рутинных задач. Реализация новых функций, а также разработка модулей возможна благодаря встроенной поддержке языка Emacs Lisp (ELisp).

* ***Индентация*** (в информатике, ***компьютерных науках*** — программировании) — это форматирование кода с помощью пробелов или табуляции, которое используется для: обозначения структуры программы (например, вложенности циклов, условий, функций), повышения общей читаемости и разборчивости сложных конструкций кода, наглядного отображения логической иерархии. Следует помнить, что в языках программирования, где отступы строго регламентированы (например, Python), некорректная ***индентация*** вызывает ошибки. В профессиональных практиках программирования существует термин ***акцидентная индентация*** — это ***непреднамеренные*** или случайные отступы в коде, которые появляются из-за ошибок либо несогласованности в оформлении. Это не часть стиля оформления кода, а результат случайных ошибок вызванных неправильной работой редактора, а также некорректным подходом к автоматическим процедурам ***дизайн***-формирования кода. Это редкое понятие в информатике, однако, с ним можно столкнуться при некорректном изложении кода, к примеру, при единовременном использовании разных стилей отступов (пробел+табуляция), а также в условиях процедур автоматической ***индентации*** с ошибками (неправильный перенос строк и т.п.).

** Неразрывный пробел используется для того, чтобы избежать ***автоматического*** переноса текста в нежелательных местах, например, между числом и единицей измерения, именами, ссылками и т.п. В LISP есть возможность использовать функцию make-string с кодом символа, выглядеть это будет следующим образом: (format nil "Nyquist~u" #x00A0) → (format nil " Nyquist~u" (code-char #x00A0)), в непечатных кавычках «""» указан пример использования неразрывного пробела. В статье (и в ***продолжение разработки темы*** в других исследованиях) автором приняты следующие ***условные обозначения***:

«⟶» — обозначение прямой (горизонтальной) логической взаимосвязи строк кода; «↔» — прямая и обратная (горизонтальная) логическая взаимосвязь строк кода; «↓» — прямая (вертикальная) взаимосвязь строк кода, а также некоторых вычислительных элементов используемых в мультиблоковой нотации; «↕» — прямая и обратная (вертикальная) логическая взаимосвязь строк кода; «…» — знак продолжения (цикл, итерация, любая логическая и математическая операция); «⟵» — обозначение прямой (горизонтальной) логической взаимосвязи строк кода, используется для указания обратной последовательности; «|» — разделитель нумерации строк кода («||» — двухуровневый раз-

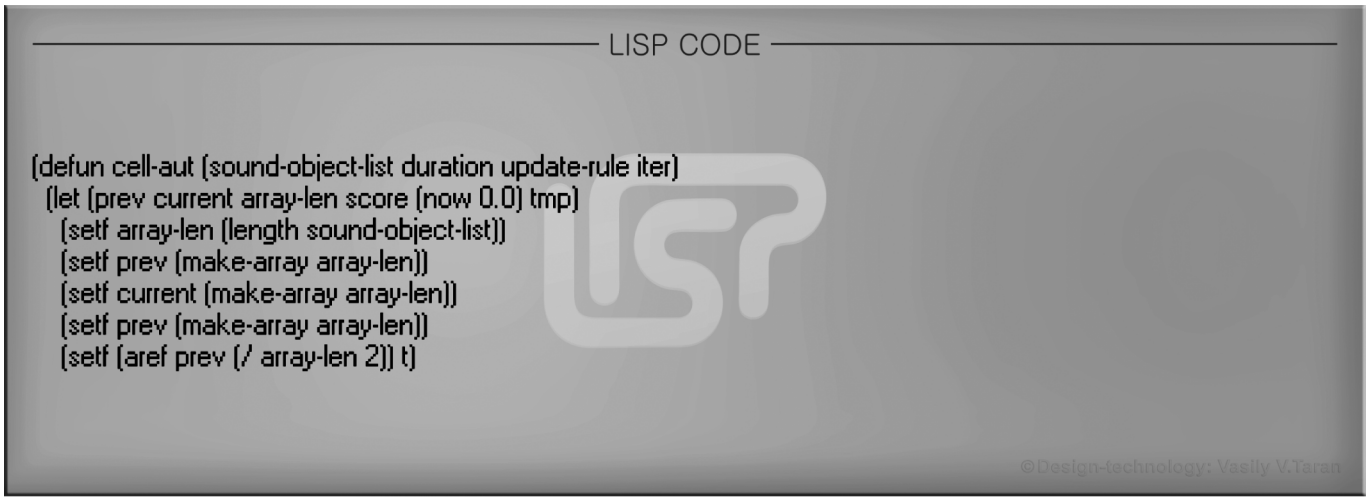


Рис. 2. Фрагмент кода функции cell-aut для генерации звуковых комбинаций на принципе клеточных автоматов (моделирование клеточного автомата)

— Если «a» *истина* (не nil), abc устанавливается в значение 16.

2.| (cond (b (setf abc (* abc 4))))

— Если «b» *истина*, abc умножается на 4.

3.| (cond (c (setf abc (* abc 2))))

— Если «c» *истина*, abc умножается на 2.

Обратите внимание: cond в LISP без:else (или t) — это проверка условий. В данном случае, поскольку условия просто a, b, c, то они рассматриваются как логические выражения. Если a, b, c — nil, условие *ложно*, иначе — *истинно*.

Обновление rule:

(setf rule (logand rule abc))

rule обновляется с помощью побитовой операции logand (логическое «И» по битам) между текущим значением rule и вычисленным abc.

Возврат значения:

(> rule 0)

Возвращается логическое выражение: истина (t), если rule больше 0, иначе — nil.

В зависимости от булевых элементов a, b, c, переменная abc принимает разные значения (1, 16, 64, 32). Затем rule обновляется с помощью побитового «И» с этим значением. В конце проверяется, является ли rule больше нуля, и возвращается t или nil. В прологе реализуется часть логики для обновления *правил* и состояний ячеек, основанных на битовых масках, с учётом условий a, b, c. Следующий раздел кода отвечает за моделирование структуры клеточных автоматов при инициализации массивов состояния, устанавливает локальные зоны ближайшей активной клетки в середине массива (рисунок №2).

Объявление функции:

cell-aut — название функции.

Аргументы:

1) sound-object-list — список «объектов» (может быть массив или список, зависит от использования).
2) duration — длительность (для модели времени).
3) update-rule — *правило* обновления (может быть либо функцией, либо данными).
4) *iter* — число итераций или цикл.

Объявление локальных переменных:

1) prev, current — массивы (осуществляют хранение топологии перехода состояний — текущее состояние, предшествующее состояние).
2) array-len — длина массива.
3) score — переменная для подсчёта или оценки.
4) (now 0.0) — начальное значение с плавающей точкой.
5) tmp — временная переменная.

Инициализация:

1) array-len устанавливается равным длине sound-object-list.
2) Создаются два массива prev и current с длиной array-len.

Повторное создание prev:

делитель вложенной нумерации строк кода, «|*|» — разделитель обратной нумерации строк кода). Непечатные кавычки используются только в структуре кода «"»». Печатные кавычки (литературные кавычки) используются по тексту статьи для поддержания норм и структуры русского языка, а также в целях выделения цитат особых (ключевых) слов, выражений и авторских смысловых конструкций.

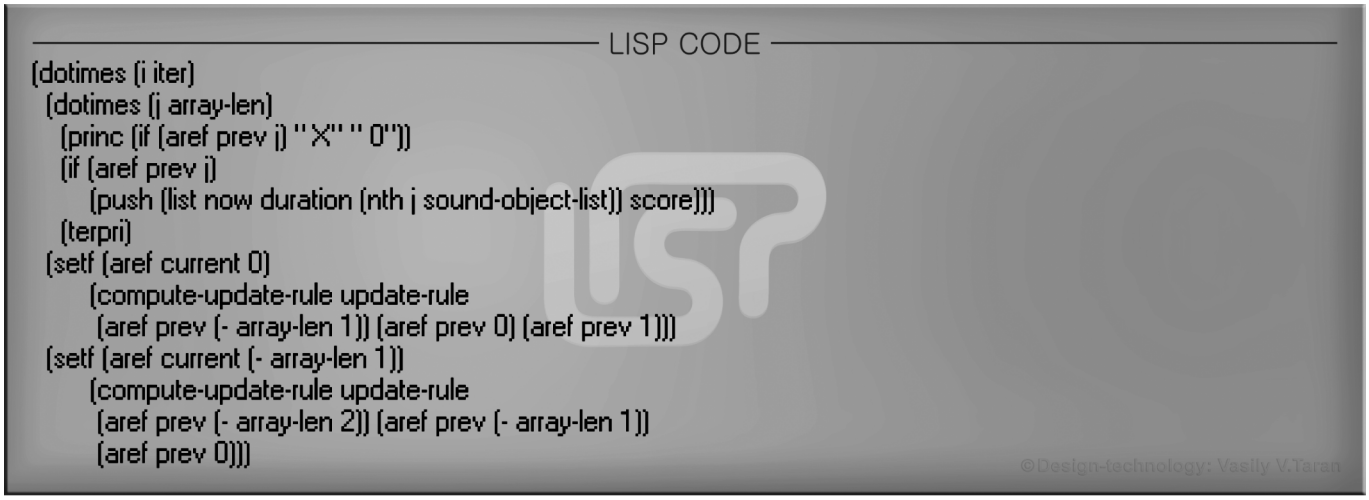


Рис. 3. Фрагмент кода функции cell-aut для генерации звуковых комбинаций на принципе клеточных автоматов (часть эмуляции клеточного автомата с циклическими границами, которая одновременно ведёт лог событий, например, учёт нот для музыкальной системы)

В строке (setf prev (make-array array-len)) создаётся новый массив и присваивается prev (*предыдущий* массив). Здесь есть повторное присваивание тому же *prev*[8].

Инициализация центрального элемента:

(aref prev (/ array-len 2)) — обращение к *центральному* элементу массива *prev* → (setf ... t) — устанавливает его в t (истина).

В целом это подготовительный фрагмент функции, которая моделирует клеточный автомат на этапах *инициализации* массивов состояния и установки начальной (*живой*) клетки посередине массива. Следующий фрагмент кода библиотеки, рисунок № 3, эмулирует клеточный автомат с циклическими границами.

Этот фрагмент кода — часть функции, которая реализует обновление состояния клеточного автомата. Она выполняется в цикле dotimes, повторяющемся *iter* раз, и внутри него есть вложенный цикл dotimes по индексам j, который проходит по элементам массива. *Внешний цикл*:

(dotimes (i iter) — повторяет весь блок *iter* раз, выполняя обновление состояния.

Внутренний цикл:

(dotimes (j array-len) — *итерируется* по индексам массива prev (current), длиной array-len.

Внутри цикла.

Вывод текущего состояния элемента:

(princ (if (aref prev j) « X» « 0»)) — Проверяет, истина ли элемент prev[j].

Если да — выводит «X».

1) Если нет — выводит «0» (пробел + ноль).

Далее следует добавление «ноты» в список (для характеристики звука):

(if (aref prev j)

(push (list now duration (nth j sound-object-list)) score))

Если prev[j] истинно, то добавляет в список *score* элемент вида:

list — из текущего времени now, длительности duration и объекта из *sound-object-list* по индексу j. Используется для записи событий (например, нот), связанных с *активными* клетками. Переход на новую строку (*новую строку вывода*):

(terpri)

Переходит на *новую строку* в *выводе*. После завершения внутреннего цикла следует обновление краевых элементов массива current:

```
1.| (setf (aref current 0)
2.| (compute-update-rule update-rule
3.| (aref prev (— array-len 1)) (aref prev 0) (aref prev 1)))
4.| (setf (aref current (— array-len 1))
5.| (compute-update-rule update-rule
6.| (aref prev (— array-len 2)) (aref prev (— array-len 1))
7.| (aref prev 0)))
```

Код выполняет обновление элементов массива current на основе значений массива prev и функции compute-update-rule.

[8] Прим.автора. Скорее всего, это лишний вызов — повторный вызов setf перезапишет ***первое*** обращение, и первый массив может ***утечь*** (если он не сохранён в другой локации). Вероятно, здесь удобнее использовать связку prev и current, а повторное создание может привести к замедлению операции.

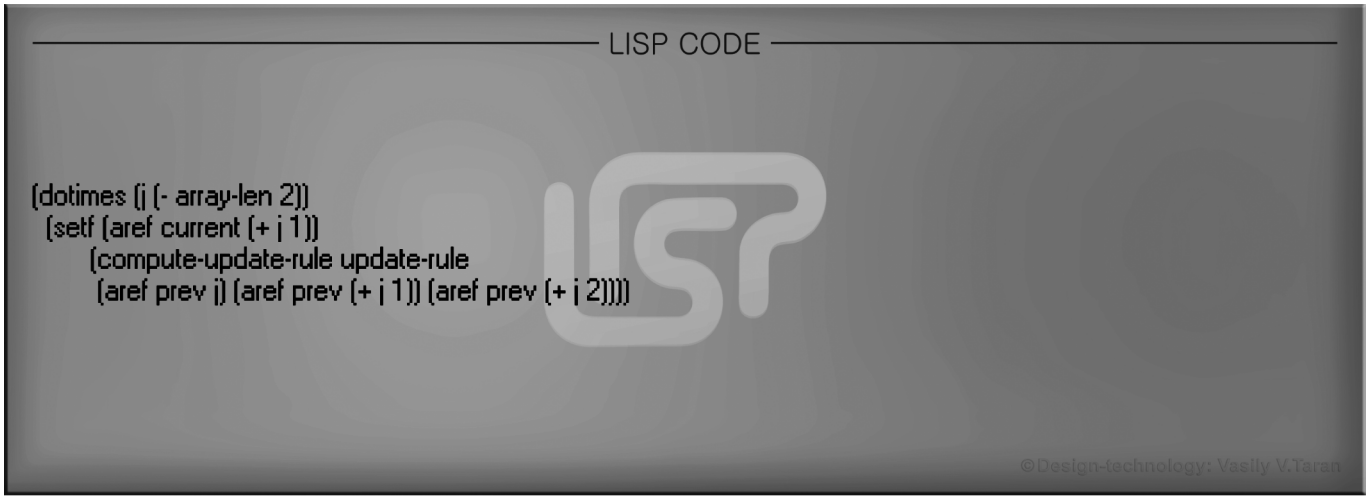


Рис. 4. Фрагмент кода функции cell-aut для генерации звуковых комбинаций на принципе клеточных автоматов (обновление внутренних элементов массива current (не крайние), основываясь на тройках соседних элементов массива prev с помощью *правила* compute-update-rule)

Обозначим:

1) current[i] — элемент массива current в позиции i;
2) prev[i] — элемент массива prev в позиции i;
3) len — длина массива array;
4) compute-update-rule (update_rule, a, b, c) — функция, применяемая к тройке значений.

Анализ фрагмента кода.

Первый элемент массива current (позиция 0):

current [0] =compute-update-rule(update_rule,prev[len −1],prev[0],prev[1])

Последний элемент массива current (позиция len-1):

current[len−1] =compute-update-rule (update_rule, prev[len−2],prev[len−1],prev[0])

Общий вид, учитывая, что индекс «-1» — это последний элемент массива, «-2» — предпоследний, и так далее.

Таким образом, итоговая конструкция будет выглядеть так:

$$\begin{cases} current[0] = \text{compute}- \text{update}- \\ -\text{rule}(update_rule, prev[\text{len}-1], prev[0], prev[1]) \\ current[\text{len}-1] = \text{compute}- \text{update}- \\ -\text{rule}(update_rule, prev[\text{len}-2], prev[\text{len}-1], prev[0]) \end{cases}$$

Обновляются крайние элементы current [0] и current[array-len-1]. Значения для них вычисляются с помощью функции compute-update-rule:

1) *для* current [0]: использует prev элементы: последний (prev[array-len-1]), первый (prev [0]), второй (prev[1]);
2) *для* current[array-len-1]: использует prev элементы: предпоследний (prev[array-len-2]), последний (prev[array-len-1]), первый (prev [0]).

Это делается для реализации циклических границ, то есть, массив воспринимается как кольцо (*цикл*). В каждом *iter*-ном шаге:

1). Выводятся текущие активные клетки (prev), отображая их как «X» или «0».
2). Для активных клеток добавляются записи в список score, связывая их с текущим временем и объектами.
3). Обновляются крайние клетки массива current, используя *правило* compute-update-rule и значения с «краёв» массива prev.

Фрагмент кода выше, рисунок № 4, производит обновление внутренних (не крайних) элементов массива current, основываясь на тройках соседних элементов массива prev с помощью *правила* контекстной функции compute-update-rule[9].

Данный фрагмент кода — часть обновления массива current внутри цикла, который реализует *правила* клеточного автомата с циклическими границами.

Цикл dotimes:

j[10] анализирует значения от 0 до array-len — 3 (всего array-len — 2 итераций).

Обновление current:

[9] Прим.автора. В диалектах LISP, функция compute-update-rule — это, как правило, пользовательская (контекстная функция), которая используется для вычисления правила обновления в алгоритмах машинного обучения, оптимизации и некоторых других итеративных процессах.

[10] Прим.автора. То есть, j — индекс, который идет по массиву prev, исключая последние два элемента.

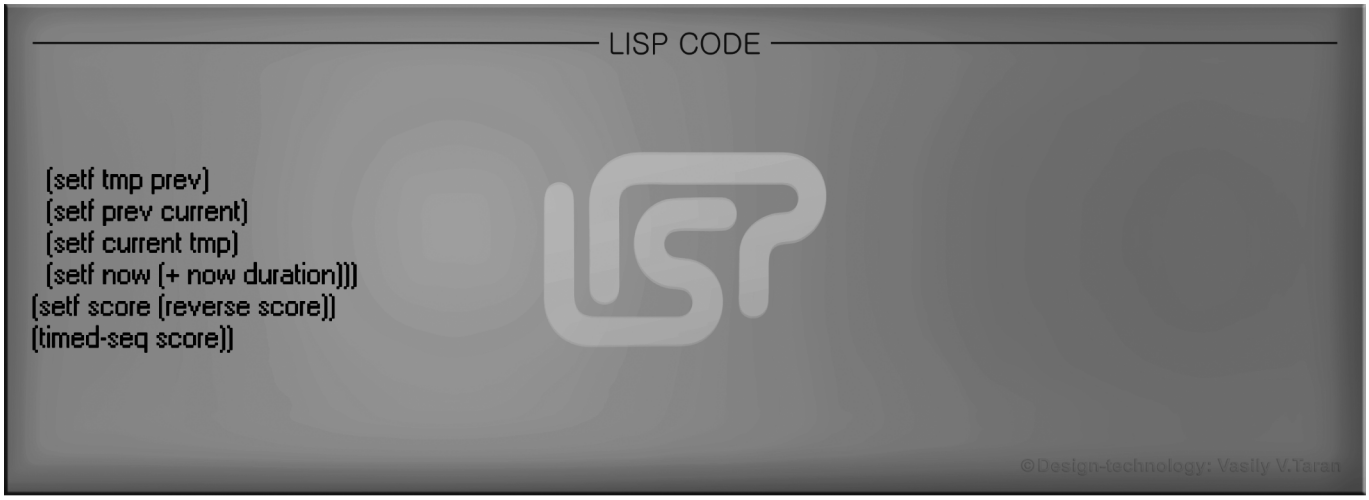


Рис. 5. Фрагмент кода функции cell-aut для генерации звуковых комбинаций на принципе клеточных автоматов (завершение итераций симуляции/генерации последовательностей и подготовка данных для дальнейшей обработки или воспроизведения)

Для каждого j обновляется элемент current[j+1].

Значение присваивается *результату* вызова функции compute-update-rule, которая применяет *правило обновления*.

Параметры compute-update-rule:
1). update-rule — *правило* (параметры *правила*);
2). prev[j] — текущий элемент массива *prev* на позиции j;
3). prev[j+1] — следующий элемент;
4). prev[j+2] — элемент следующий далее […2].

Это сдвиг или обновление элементов массива current, начиная со второго элемента (*индекс* 1), потому что current[j+1] — это позиция в массиве current[11]. Этот раздел кода обновляет внутренние элементы массива current (*не крайние*), основываясь на тройках соседних элементов массива *prev* с помощью *правила* compute-update-rule.

В данном случае это типичный подход при моделировании клеточных автоматов или подобных систем, где новые состояния элементов определяются их соседями.

Данный фрагмент кода (рисунок 5) — это часть *функционального цикла*, который управляет *обновлением состояний* и подготовкой данных для дальнейшей обработки или воспроизведения. Обмен ссылками на массивы:
1). tmp — временная переменная;
2). prev — предыдущий массив состояния;
3). current — текущий массив состояния.

Шаги:
1). tmp — сохраняет ссылку на prev;
2). prev — переназначается на current;
3). current — становится равен tmp (то есть, старому значению prev).

Вышесказанное — классический приём в области программирования для обмена значениями без копирования, чтобы подготовить массивы для следующего итерационного шага. Обновление времени:

(setf now (+ now duration))

Обновляет текущее время now, увеличивая его на duration, для формирования отсчёта прогресса времени в симуляции или последовательности. Следующая строка *переворачивает* список score:

(setf score (reverse score))

Score собирается в обратном порядке (с помощью push), и перед возвратом нужно его развернуть, чтобы получить правильный *временной* порядок событий. Далее осуществляется вызов функции timed-seq:

(timed-seq score)

Передаёт финальный список score. Функция timed-seq создаёт последовательность или объект, который использует временные метки и связанные с ними события (например, ноты, сигналы или другие события). Под-

[11] Прим.автора. В цикле идет обработка «треугольников» из трёх соседних элементов prev: [j], [j+1], [j+2]. Значения этих трёх элементов используются для вычисления нового значения для current[j+1]. Почему j идет до array-len - 2? Потому что j+2 не должен выходить за границы массива. В итоге последний j — это array-len - 3, а j+2 = array-len - 1 — последний индекс массива. Таким образом, весь диапазон покрывает все тройки соседних элементов по массиву prev, и для каждого из них вычисляется новое значение.

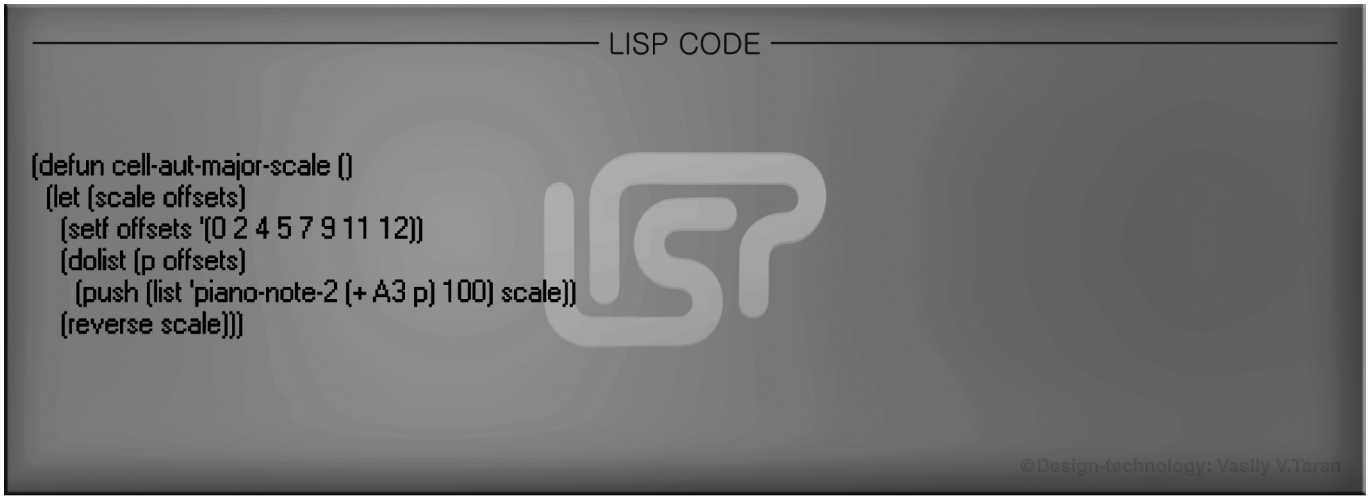


Рис. 6. Фрагмент кода функции cell-aut для генерации звуковых комбинаций на принципе клеточных автоматов (работа с нотами)

ведём промежуточный итог по части данного кода. Итак, данный блок выполняет *следующие действия*:

— Обменивает указатели на массивы, чтобы подготовить новые состояния для следующего цикла.
— Обновляет текущее время.
— Разворачивает список score, чтобы сохранить правильный порядок событий.
— Возвращает результат вызова timed-seq с этим списком.

Весь перечень действий необходим для завершения итераций *симуляции/генерации* последовательностей и подготовки данных для дальнейшей обработки или воспроизведения.

Код на рисунке № 6 определяет функцию cell-aut-major-scale, которая создает последовательность нот, соответствующую *мажорной* шкале, и возвращает их в виде *списка*. Разберём его более подробно:

1.| (defun cell-aut-major-scale ()
2.| (let (scale offsets)
3.| (setf offsets '(0 2 4 5 7 9 11 12))
4.| (dolist (p offsets)
5.| (push (list 'piano-note-2 (+ A3 p) 100) scale))
6.| (reverse scale)))

1) offsets = (0, 2, 4, 5, 7, 9, 11, 12) — фиксированный набор интервалов;
2) для каждого p в offsets создаётся нота: piano-note-2 (+ A3 p) 100;
3) итоговый список scale — это все подобные ноты в обратном порядке.

Это можно записать в виде следующей рекурсивной формулы:

$$scale = reverse(\{piano\text{-}note\text{-}2(A3 + p,100) | p \in (\{0,2,4,5,7,9,11,12\}\})$$

Работа функции.

Объявление локальных переменных:
1) scale — список для хранения нот.
2) offsets — список интервалов, соответствующих интервалам мажорной гаммы относительно тоники.

Инициализация offsets:

(setf offsets '(0 2 4 5 7 9 11 12))

Эти числа — полутона, соответствующие ступеням мажорной шкалы:

1). 0: тоника
2). 2: секунда мажорная
3). 4: терция
4). 5: кварта
5). 7: квинта
6). 9: секста
7). 11: септима
8). 12: октава

Генерация нот:
(dolist (p offsets)
(push (list 'piano-note-2 (+ A3 p) 100) scale))

Для каждого интервала p из offsets:
Создаётся список (list 'piano-note-2 (+ A3 p) 100)
'piano-note-2' — тип ноты (*вызов функции*).

(+ A3 p) — высота ноты, где A3 — *базовая нота*[*] (A3), а p — интервал.

«100» — *громкость* (в верхнем регистре длина ноты).

[*]*Эта нота добавляется в scale с помощью push.*

Обратный порядок:

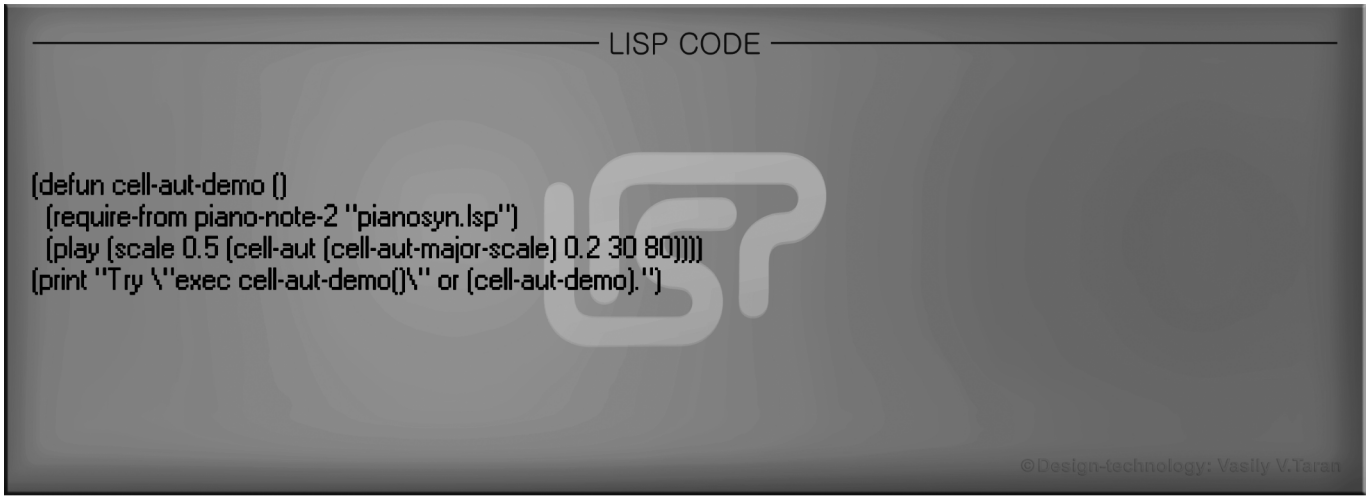


Рис. 7. Фрагмент кода функции cell-aut для генерации звуковых комбинаций на принципе клеточных автоматов (генерация музыкального паттерна с помощью клеточного автомата, основанного на мажорной гамме)

(*reverse* scale) — в конце возвращается список нот в правильном порядке (от тоники к октаве). В целом данный блок кода создаёт мажорную гамму, начиная с ноты A3, и возвращает список нот, представляющих эту гамму, готовых для воспроизведения или дальнейшей обработки. Выше, на рисунке № 7 показан фрагмент структуры кода, генерирующий музыкальный паттерн с помощью клеточного автомата, основанный на мажорной гамме.

1. *Объявление функции* cell-aut-demo

(defun cell-aut-demo ()

Здесь определяется функция с именем cell-aut-demo. Когда вы вызываете (cell-aut-demo), выполняется весь вложенный в неё код.

2. *Загрузка внешней библиотеки*

(require-from piano-note-2 «pianosyn.lsp»)

Эта строка загружает внешний файл pianosyn.lsp из источника piano-note-2. В ней содержится код, связанный с синтезом звука и работой с музыкальными нотами.

3. Воспроизведение музыкальной последовательности

(play (scale 0.5 (cell-aut (cell-aut-major-scale) 0.2 30 80)))[12]

Воспроизведение проходит несколько этапов:

- cell-aut-major-scale — генерирует начальную конфигурацию или паттерн для клеточного автомата, основанную на мажорной гамме.
- cell-aut — запускает клеточный автомат с этой конфигурацией и параметрами 0.2, 30, 80.
- scale 0.5 — масштабирует громкость или интенсивность звуковой последовательности, делая ее в два раза тише.
- play — воспроизводит полученную музыкальную последовательность.

4. *Вывод подсказки пользователю*

(print «Try \»exec cell-aut-demo()\» or (cell-aut-demo).»)

Печатает сообщение для пользователя, чтобы он знал, как запустить функцию.

В целом данный фрагмент кода определяет функцию, которая:

1). Загружает нужную библиотеку для синтеза звука.
2). Генерирует музыкальный паттерн с помощью клеточного автомата, основанного на мажорной гамме.
3). Воспроизводит его с *уменьшенной* громкостью.
4). И после этого *выводит сообщение*, как запустить функцию.

Теперь функционально рассмотрим фрагмент кода библиотеки pianosyn.lsp, обратимся непосредственно к piano-note (рисунок 8).

Код определяет функцию piano-note, которая создаёт и воспроизводит *музыкальную ноту* на пианино с заданной продолжительностью, высотой (тоническим интервалом) и динамикой (громкостью). Функционально это выглядит так:

Объявление функции:

(defun piano-note (duration pitch dynamic)

Функция принимает три аргумента:

1). duration — длительность ноты (например, целое число или символ, который позже интерпретируется).

[12] Прим.автора. Эти параметры управляют скоростью, количеством итераций и другими аспектами автоматики.

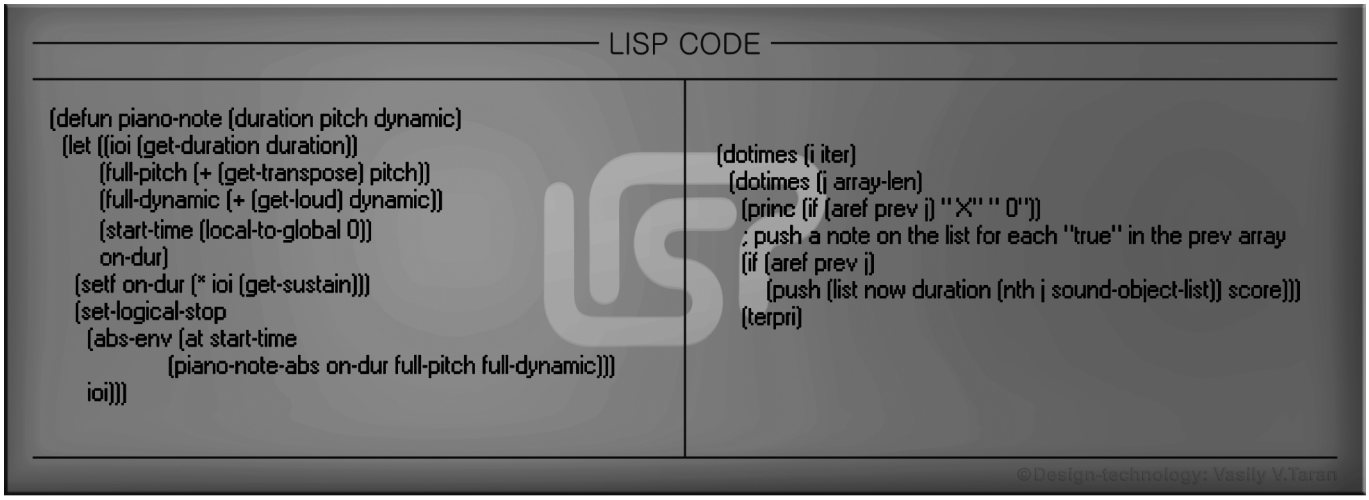


Рис. 8. Фрагмент кода библиотеки pianosyn.lsp для генерации звуковых комбинаций фортепьянных звуков по нотам — функция piano-note на принципе клеточных автоматов

2). pitch — высота ноты относительно базового тона.
3). dynamic — громкость или интенсивность исполнения.

Конструкции внутренних переменных (let):

```
1.| (let ((ioi (get-duration duration))
2.| (full-pitch (+ (get-transpose) pitch))
3.| (full-dynamic (+ (get-loud) dynamic))
4.| (start-time (local-to-global 0))
5.| on-dur)
```

Программная схемотехника переменных:

1) ioi = get_duration(*duration*)
2) full_pitch = get_transpose() + *pitch*
3) full_dynamic = get_load() + *dynamic*
4) start_time = local_to_global(0)
5) on_dur = значение, связанное с on-dur (не определено явно)

Расшифровка конструкции:

1). ioi — рассчитывает интервал между нотами (длительность) из аргумента duration, вызывая get-duration.
2). full-pitch — высота ноты, которая складывается из транспонирования (get-transpose) и переданного pitch.
3). full-dynamic — громкость, которая складывается из глобальной громкости (get-loud) и локальной *dynamic*.
4). start-time — время начала исполнения ноты, преобразованное из локального в глобальное (local-to-global 0).
5). on-dur — переменная для хранения продолжительности «звучания» ноты.

Расчёт продолжительности звучания ноты:

```
(setf on-dur (* ioi (get-sustain)))
```

В данном случае on-dur устанавливается как произведение ioi и get-sustain(). Это указывает, какая часть ноты будет звучать, основываясь на факторе сустейна (удержания). *Установка времени остановки ноты*:

```
1.| (set-logical-stop
2.| (abs-env (at start-time
3.| (piano-note-abs on-dur full-pitch full-dynamic)))
4.| ioi)
```

Опционально-технические характеристики:

1). at start-time — вызывает функцию в момент start-time.
2). piano-note-abs — создаёт абсолютное описание ноты (часто включает параметры высоты, громкости и длительности).
3). abs-env — оборачивает ноту в окружение, контролирующее её абсолютные параметры.
4). set-logical-stop — задаёт метрические параметры для завершения нот, основываясь на ioi.

Эта функция создаёт и воспроизводит ноту на пианино с заданной длительностью, высотой и динамикой, учитывая транспонирование, громкость и сустейн (удержание). Она управляет точкой начала и конца ноты, а также параметрами звука. Далее следует определение функции *piano-note*, которая создаёт и воспроизводит музыкальную ноту на пианино с заданной продолжительностью, высотой (*тоническим интервалом*) и динамикой (громкостью). *Объявление функции*:

```
(defun piano-note (duration pitch dynamic)
```

Функция принимает следующие три аргумента:

1). duration — длительность ноты (например, целое число или символ, который позже интерпретируется).
2). pitch — высота ноты, относительно базового тона.
3). dynamic — громкость (интенсивность исполнения).

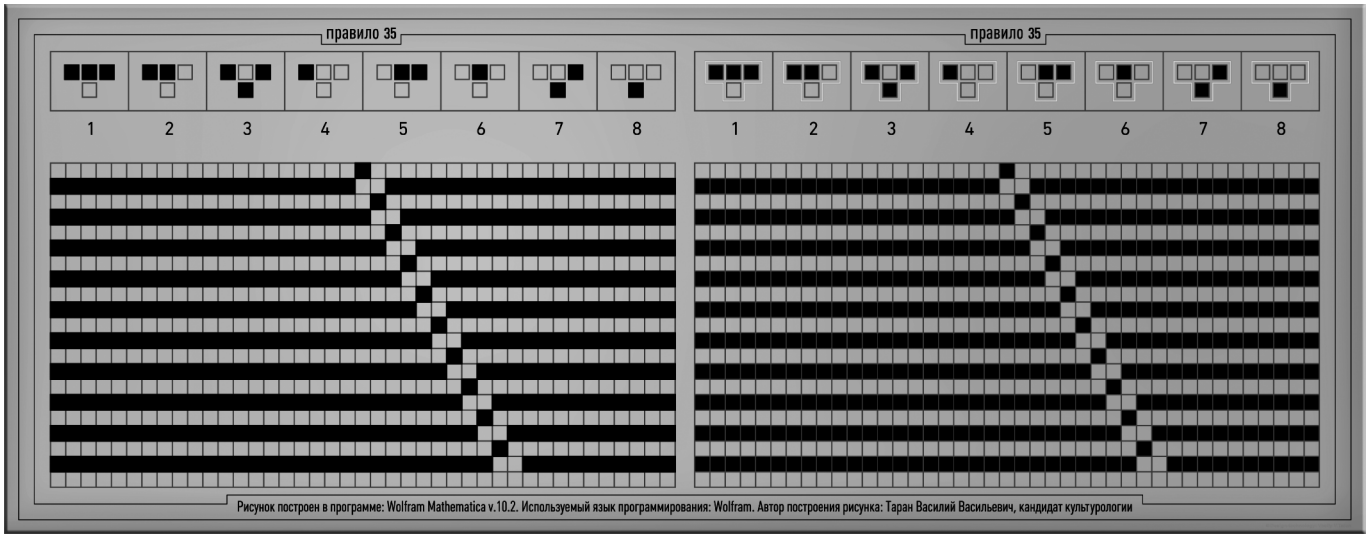


Рис. 9. Реализация воспроизведения аудиофрагмента, синтезирующего звуковую комбинацию по *правилу* 35 на принципе однородного[13] клеточного автомата в контексте обращения к коду библиотеки-*расширения* pianosyn.lsp

Внутренние переменные (let):

```
1.| (let ((ioi (get-duration duration))
2.| (full-pitch (+ (get-transpose) pitch))
3.| (full-dynamic (+ (get-loud) dynamic))
4.| (start-time (local-to-global 0))
5.| on-dur)
```

1) ioi = get_duration (*duration*)
2) full_pitch = get_transpose() + *pitch*
3) full_dynamic = get_loud() + *dynamic*
4) start_time = local_to_global(0)
5) on_dur = незначительно, *так как не определено явно*

Опционально-технические характеристики:

1). ioi — рассчитывает интервал между нотами (или длительность) из аргумента duration, вызывая get-duration.
2). full-pitch — высота ноты, которая складывается из транспонирования (get-transpose) и переданного pitch.
3). full-dynamic — громкость, которая складывается из глобальной громкости (get-loud) и локальной dynamic.
4). start-time — время начала исполнения ноты, преобразованное из локального в глобальное (local-to-global 0).
5). on-dur — переменная для хранения продолжительности «звучания» ноты.

Расчёт продолжительности звучания ноты:

```
(setf on-dur (* ioi (get-sustain)))
```

Здесь on-dur устанавливается как произведение ioi и get-sustain(). Это указывает, какая часть ноты будет звучать, основываясь на факторе сустейна (удержания).

Установка времени остановки ноты:

```
1.| (set-logical-stop
2.| (abs-env (at start-time
3.| (piano-note-abs on-dur full-pitch full-dynamic)))
4.| ioi)
```

Опционально-технические характеристики:

1). at start-time — вызывает функцию в момент start-time.
2). piano-note-abs — создаёт абсолютное описание ноты (включает параметры высоты, громкости и длительности).
3). abs-env — оборачивает ноту в окружение, контролирующее её абсолютные параметры.
4). set-logical-stop — задаёт метрические параметры для завершения нот, основываясь на ioi.

Подытоживая фрагмент структуры раздела данного кода, отметим, что он воспроизводит ноту на пианино с заданной длительностью, высотой и динамикой, учитывая транспонирование, громкость и сустейн (удержание). Она управляет точкой начала и конца ноты, а также параметрами звука. Проведя технико-функциональный анализ основной структуры программного кода, подключаемых библиотек-*расширений* языка программирования Nyquist, перейдём к изложению *базовой* логики работы клеточных автоматов по *правилам* 35 и 95, взаимодействующих на фрагментарном уровне с кодовыми конструкциями cell-aut.lsp и pianosyn.lsp. Вычисли-

[13] Прим.автора. Правило 35 — это правило обновления для однородного клеточного автомата, где все клетки используют одинаковое правило обновления, которое задаётся числом 35 (обычно по системе нумерации правил Вольфрама). Термин «однородный клеточный автомат» подразумевает автомат, в котором все клетки следуют одному и тому же правилу обновления. Правило 35 — это однородное клеточное правило, которое обновляет состояние каждой клетки в зависимости от тройки соседних клеток, согласно заданной двоичной схемы.



Рис. 10. Реализация (авторского) базового программного кода клеточного автомата с пиктограммно-блоковой легендой по *правилу* 35

тельная логика (рисунок № 9) и неявная программная схемотехника (рисунок № 10), иллюстрируемая нижеследующим разделом настоящей статьи, наглядно демонстрирует распределение топологий звуковых сигналов в виде клеток для получения новых уникальных образцов полифонических аудиоматериалов.

На рисунке 9 показана логика поведений аудиосигнала по *правилу* 35 в соответствии с функцией piano-note (рисунок № 8), обращение к этой функции позволяет в автоматическом режиме имитировать звучание фортепианной струны в зависимости от назначенной ноты. Параметры поведения ноты в однородном клеточном автомате регулируются фазой затухания, продолжительностью звучания, а также шириной диапазона частот. Ниже в таблице 1 приводятся общие координаты для построения *правил* поведения и топологического распределения аудиосигнала в клеточных автоматах.

Логика поведения аудиосигнала по *правилу* 35 будет выглядеть следующим образом:

Для одномерного клеточного автомата с тремя клетками (*левая*, *центральная*, *правая*) предполагается 8 конфигураций (таблица 2):

Представляем перечисленные конфигурации в *двоичном* коде.

Таблица 1.

Координаты вариативного построения клеточных автоматов по указанным в таблице *правилам**

Правило 35	Правило 95
Алгебраическая форма конструкции	
(p, q, r) ↦ ((1 + q) (1 + p + p r)) mod 2	(p, q, r) ↦ (1 + p r) mod 2
Форма булевых значений	
(p, q, r) ↦ (NOT q) AND (r OR (NOT p))	(p, q, r) ↦ NOT (p AND r)
Текстовая форма	
(p, q, r) ↦ ¬q ∧ (r ∨ ¬p)	(p, q, r) ↦ ¬ (p ∧ r)

** координаты используются для универсального построения базовой логики клеточных автоматов вне зависимости от языка программирования.*

Объединяем три бита (левый, центральный, правый) в один — в порядке слева направо (таблица 3):

Правило задаётся числом 35[14].

Переведём число 35 в двоичный вид с 8 битами (таблица 4):

[14] В двоичной системе 35 — это «00100011». Эта двоичная последовательность показывает, какие конфигурации приводят к следующему состоянию — «1», а какие — к «0».

Таблица 2.

Возможные конфигурации соседей

Левый сосед		Центральная клетка	Правый сосед
1.	1	1	1
2.	1	1	0
3.	1	0	1
4.	1	0	0
5.	0	1	1
6.	0	1	0
7.	0	0	1
8.	0	0	0

Таблица 3.

Конфигурации в двоичном виде

Конфигурация		Биты	Двоичное число	Десятичное число
1.	111	1 1 1	111	7
2.	110	1 1 0	110	6
3.	101	1 0 1	101	5
4.	100	1 0 0	100	4
5.	011	0 1 1	011	3
6.	010	0 1 0	010	2
7.	001	0 0 1	001	1
8.	000	0 0 0	000	0

Таблица 4.

Число 35 в двоичном виде с 8 битами

Бит позиции	7	6	5	4	3	2	1	0
Значение	0	0	1	0	0	0	1	1

Конфигурации:

1) 111 (позиция 7) — 0
2) 110 (6) — 0
3) 101 (5) — 1
4) 100 (4) — 0
5) 011 (3) — 0
6) 010 (2) — 0
7) 001 (1) — 1
8) 000 (0) — 1

Таблица 5 отображает для *каждой* конфигурации соседей новое состояние центральной клетки (*см*. таблицу 2).

Вычисление вероятности состояния центральной ячейки:

Таблица 5.

Таблица состояний по *правилу* 35

Конфигурация соседей		Бинарное представление	Новое состояние по *правилу* 35
1.	111	111	0
2.	110	110	0
3.	101	101	1
4.	100	100	0
5.	011	011	0
6.	010	010	0
7.	001	001	1
8.	000	000	1

new_state=(¬left∧¬center) ∨(center∧right)

1). left — состояние левой соседней ячейки.
2). center — текущее состояние центральной ячейки.
3). right — состояние правой соседней ячейки.
4). ¬ — отрицание (NOT).
5). ∧ — логическое «И» (AND).
6). ∨ — логическое «ИЛИ» (OR).

Вычисление:

1). Первая часть (¬left∧¬center) даёт 1, если оба соседа слева и центр равны 0.
2). Вторая часть (center∧right) даёт 1, если центр и правый сосед равны 1.
3). Общее выражение истинно (результат = 1), если истинна хотя бы одна из частей.

Ниже представлен *базовый программный код* клеточного автомата, воспроизводящий *правило* 35[15] (рисунок 10). Код обусловливает основную структуру клеточного автомата, его технические параметры и масштаб холста.

На рисунке 11 показана эволюция клеточного автомата по *правилу* 35.

Теперь обратимся к *правилу* 95, которое, по сути, представляет собой линейный двоичный автомат и характеризуется тем, что оно является простым и склонным к быстрой эволюции, распространяя единицы по линейной экспозиции, часто используется для моделирования процессов динамического (ускоренного) распространения, а также роста и захвата чего-либо

[15] Прим. автора. Поскольку логика изложения программного кода здесь схожа с конструкциями правил 30 и 90, то в целях экономии места, мы опускаем расшифровку кода, имеющего похожую структуру, поскольку его конструктивная часть подробно изложена в первой части статьи. Далее мы проиллюстрируем только логические операции правил работы клеточных автоматов.

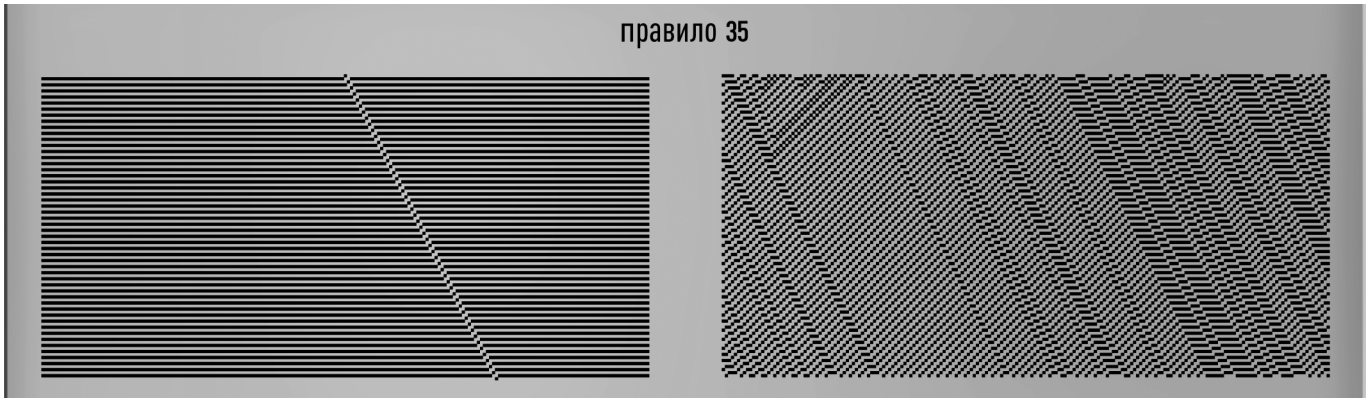


Рис. 11. Эволюция клеточного автомата по *правилу* 35

в различных системах. *Правило* 95 задаёт обновление положения клетки на основе её текущего состояния и локации соседних клеток. В контексте классических одномерных клеточных автоматов *правило* 95 определяется как *правило*, при котором новая клетка равна логической *дизъюнкции* ИЛИ (OR)[16] текущего состояния клетки и состояния её правого соседа. Вкратце, его логике можно придать следующий вид:

новое состояние = *текущее* состояние *или* «OR» состояние *правого соседа*

Правило 95 в теории клеточных автоматов применимо к моделированию систем, где важна динамика распространения, роста или захвата, а также в задачах, связанных с распространением информации или воздействием внешних факторов. В частности, его применяют для моделирования следующих ситуаций:

1) Моделирование распространения различных эпидемий:
— В медицине, биологии и информатике
- *Правило 95 моделирует быстрое распространение вируса по цепи, так как оно характеризуется высокой скоростью захвата и распространения единичных состояний (1) по линии.*

2) Моделирование процессов распространения информации:
— В информатике (кибермедицине, биоинформатике)
- *Используется для имитации ситуаций, когда наличие одного «носителя» информации быстро приводит к экспрессивной экспансии в ближайшей зоне локализации (распространению по всей системе).*

3) Моделирование процессов роста и захвата:
— В химии (биохимии, молекулярной биологии), кристаллографии
- *В системах, где важна тенденция к захвату или заполнению пространства единичными состояниями, например, моделирование роста кристаллов, распространение огня или других процессов, где «захват» происходит по принципу ИЛИ.*

4) Теоретические исследования и учебные цели:
— физико-математические науки, технические науки, биофизика, экспериментальная информатика;
- *используется для изучения свойств автоматов, таких как скорость распространения, устойчивость и переходные процессы.*

5) Моделирование процессов в теории сложности и самоорганизации:
— физико-математические науки, технические науки, теоретическая информатика, междисциплинарные и полидисциплинарные исследования;
- *правило 95 помогает понять, как локальные взаимодействия приводят к глобальным эффектам. Например, как локальные правила приводят к быстрому захвату всей системы.*

В аудиоинформатике *правило* 95 может использоваться в теории звука (моделирование звуковых волн) а также в некоторых прикладных исследованиях для создания уникальных звуковых эффектов, паттернов и генеративных композиций, благодаря своим уникальным свойствам распространения и динамики. Вот некоторые примеры использования данного *правила*:

1) Генерация ритмов и паттернов:
- *Используя правило 95, можно моделировать создание ритмических паттернов, где «захваченные» клетки (состояние 1) быстро распространяются по ритмической последовательности, создавая оригинальные, динамичные и непредсказуемые ритмы.*

2) Создание случайных или эволюционных звуковых текстур:
- *Автомат можно применять для генерации случайных последовательностей, которые затем преобразуются в звуковые волны или MIDI-сообщения, создавая уникальные звуковые текстуры, шумы или мелодии.*

3) Моделирование эффектов распространения звука:
- *Правило 95 можно использовать для моделирова-*

[16] Прим.автора. Новое состояние клетки определяется логической операцией OR (ИЛИ) между её текущим состоянием и локацией её правого соседа.

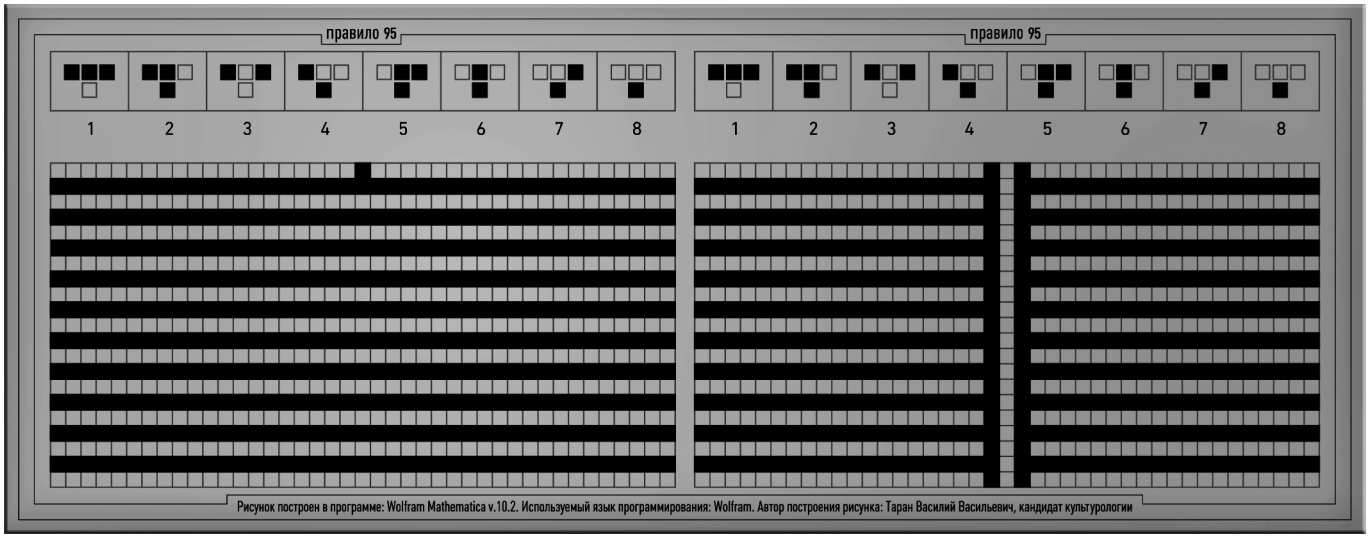


Рис. 12. Принцип работы клеточного автомата по *правилу* 95

ния распространения звуковых волн или эффектов «захвата» в акустических моделях. Например, для имитации эхообразных откликов или реверберации, где звуковые сигналы «захватывают» соседние области.

4) Генерация алгоритмических композиционных структур:

- *Можно создавать алгоритмы, в которых музыкальные события (ноты, аккорды) активируются и распространяются по цепочке в соответствии с автоматом, создавая сложные и не повторяющиеся паттерны.*

5) Визуально-звуковое представление:

- *Использовать автомат для визуализации процесса распространения в реальном времени, а звуки воспроизводить в такт с изменениями визуальных паттернов, создавая мультимедийные инсталляции.*

Вышеуказанные пункты показывают, насколько эффективно можно применять это *правило* для организации имитационных моделей в сфере программной звукотехники.

Логика поведения аудиосигнала по *правилу* 95 будет выглядеть следующим образом:

— Определим вероятные конфигурации топологий соседствующих объектов, таблица 6.

В таблице 6 определена структурная конфигурация соседствующих друг с другом элементов (*ячеек*). Это также одномерный клеточный автомат с тремя клетками (левая, *центральная*, правая) и здесь по-прежнему возможны только восемь конфигураций.

— Представим *правило* 95 в двоичной форме[17], таблица 7.

[17] Прим.автора. Число 95 в двоичной системе: 01011111.

Таблица 6.

Возможные конфигурации соседствующих объектов (ячеек)

Левая соседствующая клетка		Центральная клетка	Правая соседствующая клетка	Двоичное число	Десятичное число
1.	1	1	1	111	7
2.	1	1	0	110	6
3.	1	0	1	101	5
4.	1	0	0	100	4
5.	0	1	1	011	3
6.	0	1	0	010	2
7.	0	0	1	001	1
8.	0	0	0	000	0

Таблица 7.

Расположение битов в соответствии с топологией вероятных конфигураций соседствующих объектов

Конфигурация		Индекс (от 0 до 7)	Бит в двоичной записи	Значение
1.	111	7	0	0
2.	110	6	1	1
3.	101	5	0	0
4.	100	4	1	1
5.	011	3	1	1
6.	010	2	1	1
7.	001	1	1	1
8.	000	0	0	0

Таблица 8.

Таблица переходов, определяющих состояние активных клеток на ячейках холста

Конфигурация соседних клеток		Бинарное представление	Новое состояние по *правилу* 95
1.	111	111	0
2.	110	110	1
3.	101	101	0
4.	100	100	1
5.	011	011	1
6.	010	010	1
7.	001	001	1
8.	000	000	0

— Сформируем таблицу переходов для верификации состояний активных клеток на холсте, таблица 8.

Для каждой конфигурации соседствующих элементов таблица 8 показывает, какое новое состояние должна принять центральная клетка по *правилу* 95.

Логика вычисления вероятности состояния центральной ячейки:

$$new_state=(left\wedge\neg center\wedge right)\vee(\neg left\wedge center)\vee(center\wedge\neg right)$$

где: left — состояние левой соседней ячейки, center — текущее состояние центральной ячейки, right — состояние правой соседней ячейки, ¬ — отрицание (NOT), ∧ — логическое «И» (AND), ∨ — логическое «ИЛИ» (OR).

Вычисление:

1). Первая часть (left∧¬center∧right) даёт 1, если left = 1, center = 0, right = 1.
2). Вторая часть (¬left∧center) даёт 1, если left = 0, center = 1 (независимо от right).
3). Третья часть (center∧¬right) даёт 1, если center = 1, right = 0 (независимо от left).
4). Общее выражение истинно (результат = 1) если истинна хотя бы одна из частей.

Ниже (на рисунке 13) представлен авторский программный код для построения полноценной структуры клеточного автомата по *правилу* 95. За ним следует рисунок 14, характеризующий эволюцию топологии состояний, поэтому же *правилу*.

Ниже на рисунке 14 показана эволюция клеток по *правилу* 95.

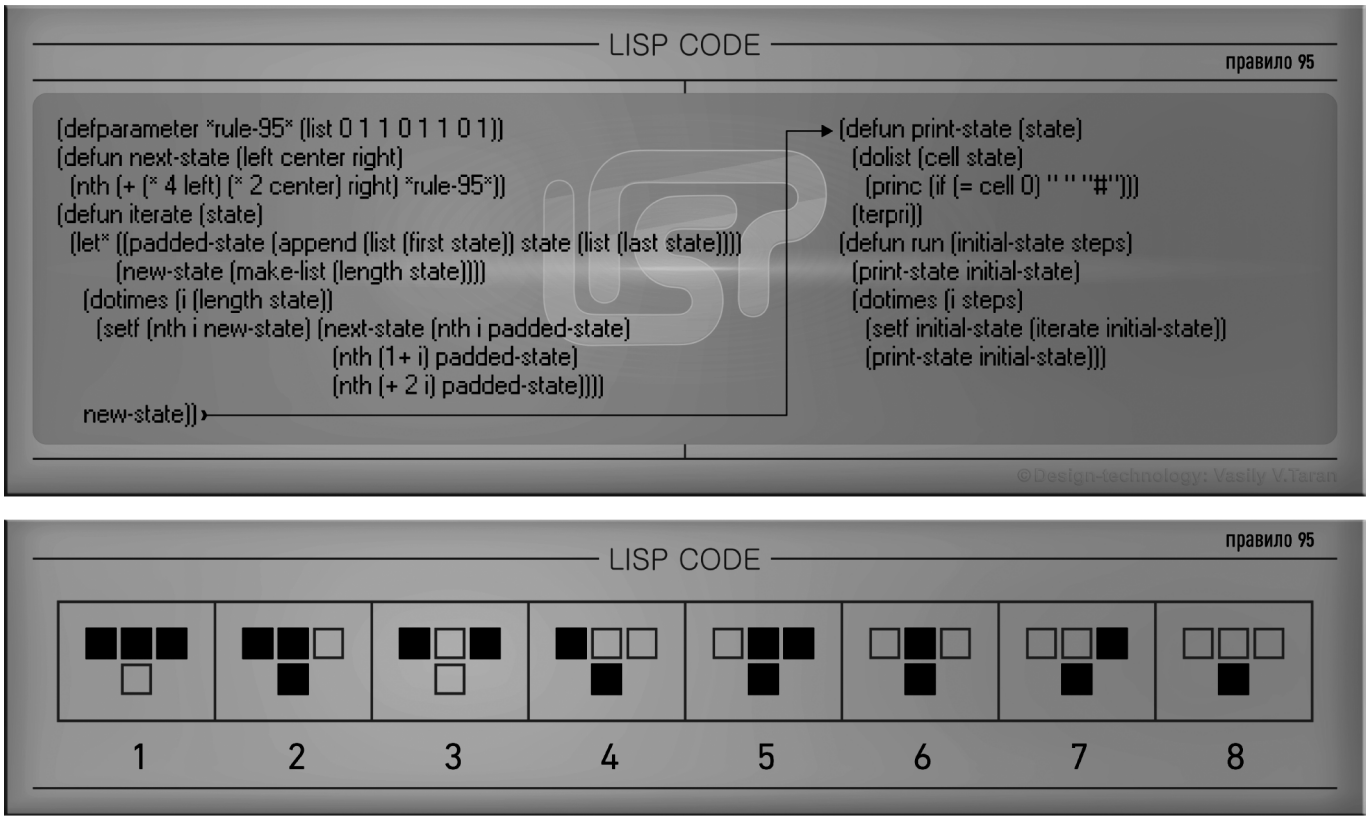


Рис. 13. Авторский программный код для построения полноценного клеточного автомата с пиктограммно-блоковой легендой по *правилу* 95



Рис. 14. Эволюция клеток (топология состояний) по *правилу* 95

В заключение отметим, что проблема создания оригинальных аудиофонических структур остаётся весьма актуальной, это показывает современное состояние развития аудиоинформатики, что также подтверждается весомыми аргументами, приведёнными автором в начале статьи. Клеточные автоматы и аудиосинтез, которые можно реализовать в соответствии с их принципами, могут усилить питательность исследовательской почвы, что, в свою очередь, откроет широкие горизонты для приращения научного знания в области компьютерных наук в целом и аудоинформатики в частности.

Проведённый технико-функциональный анализ в настоящем исследовании показывает, насколько важным является понимание хода вычислительных операций и процедур оперативной верификации данных для продолжения дальнейших научных изысканий по указанной автором теме.

Автор выражает надежду, что практики совершенствования составления алгоритмическо-программных конструкций синтетико-звуковых комбинаций, изложенные в данной рукописи, откроют новую страницу в истории программирования и вычислительной техники, обогатят научную картину и побудят различных исследователей к поиску сверхновых решений в области обработки звука.

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: 05.02.2026].
4. Таран В.В. О развитии концепции Всемирной паутины / В.В. Таран // Научно-техническая информация, серия 2. — 2019. — № 5. — С. 1–9.
5. Таран В.В. Проектирование дизайна аудиопродукции в программной среде Audacity® с применением языка Nyquist // Современная наука актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и технические науки. — 2019. — №10. — С.159–171.
6. Таран В.В. Компьютерный аудиосинтез штатными средствами Audacity® с возможностью имитационного дизайн-моделирования на языке Nyquist // Современная наука актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и технические науки. — 2020. — №1. — С.115–129.
7. Таран В.В. Язык программирования Nyquist: настоящее время и перспективы его развития в области компьютерной аудиоинженерии и аудиоинформатики // Современная наука актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и технические науки — 2020. — №4. — С.135–153. DOI 10.37882/2223—2966.2020.04.37
8. Таран В.В. Компьютерная очистка аудиоматериала штатными средствами программы Audacity® (программно-ориентированный подход) // Современная наука актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и технические науки. — 2020. — №9. — С.112–128. DOI 10.37882/2223—2966.2020.09.37
9. Таран В.В. Корректировка аудиосигнала при монтаже аудиозаписей в программной среде Audacity®, используя мультифункциональные возможности языка программирования Nyquist // Современная наука актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и технические науки. — 2021. — №3. — С.155–202. DOI 10.37882/2223-2966.2021.03.32.
10. Таран В.В. Актуальные проблемы развития аудиоинженерии в России и их философско-техническое обоснование / В.В. Таран // Материалы X международной научно-практической конференции Фундаментальная наука и технологии — перспективные разработки [Технические науки], North Charleston, USA. — 2016 г., Том 1 стр. 120.
11. Таран В.В. Сравнительный анализ качества передаваемой информации форматами MP3, OGG, AIFF, WMA для оптимального выбора трансляции в Интернете / В.В. Таран // Материалы XVII международной научно-практической конференции Академическая наука — проблемы и достижения (Технические науки), North Charleston, USA. — 2018 г., Том 1, стр.78–94. [ISBN: 978–1729559000].

12. Таран В.В. Аудиомастеринг и интернет-телевидение: возможности для учреждений культуры и образования (доклад) / III Культурный Форум регионов России «Образование и культура: потенциал взаимодействия и ресурсы НКО в социокультурном развитии регионов России // Секция (мастер-класс): Цифровые технологии и дизайн в социокультурной сфере и образовании граждан, Москва — 22.10. 2017.
13. Touretzky, David S. Common LISP: a gentle introduction to symbolic computation /Carnegie Mellon University///Copyright (c) 1990 by Symbolic Technology, Ltd.//// Published by The Benjamin / Cummings Publishing Company, Inc. — 587 p. [ISBN 0-8053-0492-4].
14. Wolfram, S. A New Kind of Science. — Champaign: Wolfram Media, 2002. — 1197 p.
15. 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.
16. Dannenberg R.B. Nyquist Reference Manual Version 3.16 // Carnegie Mellon University — School of Computer Science/ Pittsburgh, PA 15213, U.S.A. 2013–2020 WEB-version, URL: http://www.cs.cmu.edu/~rbd/doc/nyquist/ [дата обращения к электронному ресурсу: 05.02.2026].
17. Dannenberg R.B. Nyquist Reference Manual Version 3.15 // Carnegie Mellon University — School of Computer Science/ Pittsburgh, PA 15213, U.S.A. 11.08. 2018, 276 p.
18. Dannenberg R.B. Nyquist Reference Manual Version 3.09 // Carnegie Mellon University — School of Computer Science/ Pittsburgh, PA 15213, U.S.A. 27.12. 2014, 297 p.
19. Dannenberg R.B. Nyquist Reference Manual Version 2.36 // Carnegie Mellon University — School of Computer Science/ Pittsburgh, PA 15213, U.S.A. 05.03. 2007, 205 p.
20. Dannenberg R. Hu N. «Discovering Musical Structure in Audio Recordings» in Anagnostopoulou, Ferrand, and Smaill, eds., Music, and Artificial Intelligence: Second International Conference, ICMAI 2002, Edinburgh, Scotland, UK. Berlin: Springer, 2002. pp. 43–57.

© Таран Василий Васильевич (allscience@lenta.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.41

МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ QOS-МАРШРУТИЗАЦИИ ПОТОКОВ КОРПОРАТИВНЫХ ДАННЫХ В ГЛОБАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ОБЛАЧНЫХ СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

MODEL AND ALGORITHMS FOR QOS-ROUTING OF CORPORATE DATA FLOWS IN GLOBALLY DISTRIBUTED REAL-TIME CLOUD SYSTEMS

D. Titov
O. Romashkova

Summary. The article examines the problem of ensuring Quality of Service (QoS) in the routing of corporate data flows in globally distributed real-time cloud systems. The relevance of the study is due to the need for migration of Russian enterprises to domestic cloud infrastructure (Yandex Cloud, VK Cloud, SberCloud) and compliance with requirements of RF legislation in the field of data sovereignty. A mathematical model of multi-criteria routing is proposed, considering the geographical extent of Russian communication networks and heterogeneity of data transmission channels. An adaptive routing algorithm has been developed that allows dynamic redistribution of traffic under conditions of peak loads and network node failures. A comparative analysis of the proposed algorithm with existing solutions has been conducted, including simulation on real-world topologies of Russian data centers. The results demonstrated the effectiveness of the algorithm in reducing latency by 40 %, jitter by 70 %, and increasing bandwidth utilization by 34 %.

Keywords: QoS-routing, real-time cloud systems, corporate data, import substitution, distributed systems, Yandex Cloud, VK Cloud, optimization algorithms, multi-criteria optimization.

Титов Дмитрий Андреевич
Аспирант, ГАОУ ВО, Московский городской педагогический университет
pointtitov@yandex.ru
Ромашкова Оксана Николаевна
Доктор технических наук, профессор, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, г. Москва
ox-rom@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема обеспечения качества обслуживания (QoS) при маршрутизации потоков корпоративных данных в глобально распределённых облачных системах реального времени. Актуальность исследования обусловлена необходимостью миграции российских предприятий на отечественную облачную инфраструктуру (Yandex Cloud, VK Cloud, SberCloud) и соблюдением требований законодательства РФ в области суверенитета данных. Предложена математическая модель мультикритериальной маршрутизации, учитывающая географическую протяжённость российских сетей связи и неоднородность каналов передачи данных. Разработан адаптивный алгоритм маршрутизации, позволяющий динамически перераспределять трафик в условиях пиковых нагрузок и отказов узлов сети. Проведен сравнительный анализ предложенного алгоритма с существующими решениями, включая моделирование в реальных топологиях российских ЦОД. Результаты показали эффективность алгоритма в снижении задержек на 40 %, джиттера на 70 % и повышении утилизации пропускной способности на 34 %.

Ключевые слова: QoS-маршрутизация, облачные системы реального времени, корпоративные данные, импортозамещение, распределённые системы, Yandex Cloud, VK Cloud, алгоритмы оптимизации, мультикритериальная оптимизация.

Введение

В условиях активного импортозамещения и цифровой трансформации российской экономики перед крупными отечественными предприятиями встает задача построения надежных распределенных информационных систем. Переход от использования зарубежных гиперскейлеров (AWS, Azure) к решениям российских провайдеров, таких как Yandex Cloud, VK Cloud и Cloud.ru, требует пересмотра подходов к управлению сетевым трафиком [1, 2]. Ключевым вызовом становится обеспечение гарантированного качества обслуживания (Quality of Service, QoS) для приложений реального времени (видеоконференцсвязь, системы промышленного интернета вещей, финансовые транзакции) в условиях географической распределенности центров обработки данных (ЦОД) по территории Российской Федерации.

Специфика российского сегмента сети Интернет характеризуется высокой вариативностью задержек на магистральных каналах связи, что делает классические статические протоколы маршрутизации (OSPF, BGP) недостаточно эффективными для критически важных корпоративных сервисов [3]. Исследования показывают, что задержки между московскими и дальневосточными ЦОД могут варьироваться от 80 до 250 миллисекунд в зависимости от времени суток и загруженности магистральных каналов связи [4].

Необходимость соблюдения требований 152-ФЗ «О персональных данных» и других нормативных актов

накладывает дополнительные ограничения на маршруты передачи информации, требуя исключения транзитных узлов, расположенных за пределами доверенного контура [5]. Это создает новые технические вызовы для разработчиков облачных систем, поскольку требуется обеспечить и качество обслуживания, и соответствие регуляторным требованиям одновременно.

Традиционные подходы к маршрутизации, основанные на статических метриках и протоколах дистанционных векторов, не способны адаптироваться к быстро меняющимся условиям сети. Это приводит к неэффективной утилизации имеющейся пропускной способности, избыточным задержкам и потерям пакетов для чувствительных приложений.

Целью данной работы является разработка комплексной модели и алгоритмов QoS-маршрутизации, адаптированных к особенностям инфраструктуры российских облачных провайдеров и позволяющих минимизировать задержки при передаче корпоративных данных в реальном времени при одновременном соблюдении требований по безопасности и суверенности данных.

Анализ существующих подходов к маршрутизации

Анализ современного состояния в области маршрутизации показывает, что существуют несколько основных классов решений. Первый класс — это традиционные протоколы внутренней маршрутизации (IGP), такие как OSPF (Open Shortest Path First) и IS-IS. Эти протоколы основаны на вычислении кратчайшего пути в сети и имеют хорошо разработанную теоретическую базу [6]. Однако они используют только одну метрику (обычно стоимость канала или количество переходов) и не предусмотрены для динамической адаптации к изменяющимся условиям нескольких параметров QoS.

Второй класс — это протоколы маршрутизации на основе ограничений (constraint-based routing), такие как RSVP-TE (Resource Reservation Protocol with Traffic Engineering). Эти решения позволяют резервировать ресурсы и учитывать несколько параметров при выборе маршрута. Однако они требуют значительных вычислительных ресурсов и имеют высокий overhead на управление сетью [7, 8].

Третий класс — это метаэвристические алгоритмы, включая алгоритмы муравьиной колонии (ACO), генетические алгоритмы и машинное обучение. Эти подходы показывают перспективность для решения NP-трудных задач маршрутизации и могут быстро адаптироваться к изменениям в сети [9]. Однако их применение в промышленных сетях ограничено из-за сложности реализации и неопределённости поведения в экстремальных условиях.

Четвертый класс — это подходы, основанные на программно-определяемых сетях (SDN) и Network Function Virtualization (NFV). Эти архитектуры позволяют централизованно управлять маршрутизацией и динамически перестраивать сетевую топологию [10]. Данные технологии особенно активно внедряются в российских ЦОД и облачных платформах.

Выявленный анализ показывает, что большинство существующих решений не оптимизированы под специфику российской сетевой инфраструктуры. Требуется разработка новых подходов, которые будут учитывать географическую специфику, различия в качестве каналов связи и требования российского законодательства

Математическая модель QoS-маршрутизации в распределенной среде

Для формализации задачи маршрутизации представим сетевую инфраструктуру корпоративной облачной системы в виде ориентированного графа G = (V, E), где V — множество узлов (виртуальных машин, контейнеров в кластерах Kubernetes, шлюзов безопасности), а E – множество каналов связи между ними [1, 2, 6].

Каждый канал $e_{ij} \in E$, соединяющий узлы i и j, характеризуется вектором параметров качества обслуживания

$$Q\left(e_{ij}\right) = D_{ij} J_{ij} L_{ij} C_{ij}, \quad (1)$$

где D_{ij} — задержка передачи пакета (Delay);

J_{ij} — джиттер (Jitter);

L_{ij} — вероятность потери пакетов (Packet Loss);

C_{ij} — стоимость использования канала (Cost), что особенно актуально при использовании тарифицируемых каналов связи (Interconnect) между разными зонами доступности Yandex Cloud или VK Cloud [11, 7].

Задача маршрутизации потока данных f с требованиями $R_f = D_{req} J_{req} L_{req}$ от источника s к получателю d сводится к поиску пути P_{sd}, удовлетворяющего системе ограничений

$$\begin{cases} \sum\limits_{(ij)\in P_{sd}} D_{ij} \le P_{req} \\ \sum\limits_{(ij)\in P_{sd}} J_{ij} \le J_{req} \\ 1 - \pi_{(ij)\in P_{sd}} \left(1 - L_{ij}\right) \le L_{req} \end{cases} . \quad (2)$$

В отличие от стандартных постановок, предлагаемая модель вводит дополнительный коэффициент «суверенности» канала $S_{ij} \in 0,1$, где 1 означает соответствие кана-

ла требованиям регуляторов а 0 — отсутствие гарантий безопасности. Это позволяет фильтровать маршруты, не соответствующие политике безопасности компании [11, 5].

Целевая функция минимизирует общую стоимость пути при соблюдении всех ограничений

$$F = \min \sum_{(i,j)\in P_{sd}} C_{ij} . \quad (3)$$

Специальная функция штрафа для учета перегруженных узлов вводит динамический коэффициент

$$Penalty_{ij}(t) = 1 + \alpha \cdot \max\left(0, \frac{Load_{ij}(t)}{Capacity_{ij}} - \theta\right)^2, \quad (4)$$

где $Load_{ij}(t)$ — текущая загруженность канала, $Capacity_{ij}$ — максимальная пропускная способность, $\theta = 0{,}7$ — порог перегруженности, $\alpha = 2$ — коэффициент влияния перегруженности.

Разработка адаптивного алгоритма маршрутизации

Для решения поставленной NP-трудной задачи предлагается использовать гибридный эвристический алгоритм, сочетающий элементы алгоритма муравьиной колонии (Ant Colony Optimization, ACO) и мониторинга состояния сети в реальном времени. Выбор метаэвристического подхода обусловлен высокой динамикой изменения параметров каналов в российских публичных сетях [9].

Алгоритм состоит из следующих этапов:

1. *Инициализация.* На начальном этапе выполняется инициализация таблиц феромонов для всех ребер сети. Для каждого канала e_{ij} устанавливается начальное значение феромона $\tau_{ij}(0) = \tau_0$, где τ_0 обратно пропорционально начальной стоимости канала. Параллельно запускаются агенты-исследователи, которые периодически отправляются от узла-источника *s* к узлу-назначения *d* для сбора актуальной информации о состоянии каналов. Частота отправки агентов $f_{ant} = 1 / 10$ с, что обеспечивает баланс между актуальностью информации и служебной нагрузкой.
2. *Оценка качества пути.* Каждый агент, достигший целевого узла, рассчитывает интегральную метрику качества пройденного пути Q_{path} и обновляет таблицы феромонов. Метрика качества рассчитывается как

$$Q_{path} = w_1 \cdot \frac{D_{path}}{D_{max}} + w_2 \cdot \frac{J_{path}}{J_{max}} + w_3 \cdot \frac{L_{path}}{L_{max}} + w_4 \cdot \frac{C_{path}}{C_{max}}, \quad (5)$$

где $w_1 = 0{,}4$, $w_2 = 0{,}3$, $w_3 = 0{,}2$, $w_4 = 0{,}1$ — веса различных параметров, установленные на основе экспертной оценки. Величина обновляемого феромона вычисляется как

$$\Delta\tau = \frac{1}{Q_{path}} \quad (6)$$

и добавляется к текущему значению феромона с коэффициентом затухания

$$\tau_{ij}^{new} = (1-\rho)\cdot\tau_{ij}^{old} + \rho\cdot\Delta\tau, \quad (7)$$

где $\rho = 0{,}1$ — коэффициент испарения феромона.

3. *Учет специфики инфраструктуры.* В алгоритм введен механизм «штрафов» для маршрутов, проходящих через перегруженные сегменты сети. Для российских условий характерны «бутылочные горлышки» на стыках магистральных провайдеров (например, на каналах между МСК и СПБ). Алгоритм детектирует такие узлы через резкое возрастание метрики J_{ij} и снижает вероятность выбора путей через них путем применения штрафного коэффициента $Penalty_{ij}(t)$ к значению феромона.
4. *Выбор маршрута.* Для передачи реального трафика выбирается путь с максимальной концентрацией феромона, что соответствует оптимальному сочетанию QoS-параметров на текущий момент времени. Вероятность выбора ребра e_{ij} при движении из узла *i* определяется как

$$P_{ij} = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{k\in N_i}[\tau_{ik}]^\alpha \cdot [\eta_{ik}]^\beta}, \quad (8)$$

где $\eta_{ij} = 1 / Q(e_{ij})$ — видимость ребра (обратная величина метрики QoS), $\alpha = 1{,}0$ и $\beta = 2{,}0$ — параметры влияния феромона и видимости, N_i – множество соседних узлов.

5. *Адаптивная переконфигурация.* При обнаружении отказа узла или резком ухудшении качественных показателей канала алгоритм выполняет переконфигурацию маршрутов в реальном времени, перенаправляя трафик через альтернативные пути. Время адаптации составляет менее 2 секунд для большинства типичных отказов.

Особенностью реализации алгоритма является его интеграция с сервисами мониторинга российских облачных платформ (например, Yandex Monitoring, VK Cloud Monitoring). Это позволяет получать метрики загрузки виртуальных машин и каналов без необходимости развертывания дополнительных зондов и уменьшает служебный трафик в сети [3, 4].

Сравнительный анализ и результаты

Для оценки эффективности предложенного алгоритма было проведено имитационное моделирование в среде NS-3 версии 3.36 с расширениями для моделирования облачных систем. Топология сети соответствовала структуре распределенного корпоративного облака с узлами в Москве, Санкт-Петербурге, Екатеринбурге и Новосибирске, что отражает типичную конфигурацию российских предприятий.

Сравнивались три подхода:

1. Стандартный протокол OSPF с одной метрикой (стоимость канала);
2. Алгоритм ECMP (Equal-Cost Multi-Path), распределяющий трафик поровну между несколькими путями равной стоимости;
3. Разработанный адаптивный QoS-алгоритм на основе муравьиной колонии.

В моделировании использовались следующие параметры:

— Общее число узлов сети: 24;
— Число потоков данных: 100;
— Средний размер пакета: 1472 байта;
— Интенсивность трафика: 2000 пакетов/с;
— Время моделирования: 3600 секунд (1 час реального времени);
— Максимальная задержка на канале: 120 мс;
— Максимальный джиттер: 50 мс.

Результаты сравнения показателей качества обслуживания для потока видеоконференцсвязи (требовательного к джиттеру и задержкам) представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Сравнительный анализ алгоритмов маршрутизации в условиях высокой загрузки каналов

Показатель эффективности	Протокол OSPF	Алгоритм ECMP	Предложенный QoS-алгоритм
Средняя задержка (мс)	145	112	84
Джиттер (мс)	42	28	12
Потеря пакетов (%)	3.5	2.1	0.4
Время сходимости при отказе узла (сек)	15–30	5–10	<2
Утилизация доступной полосы пропускания (%)	60	85	94

Анализ данных таблицы показывает, что предложенный алгоритм обеспечивает значительные улучшения по всем ключевым метрикам:

1. Снижение задержки: на 25 % по сравнению с ECMP (с 112 до 84 мс) и более чем на 40 % по сравнению с OSPF (с 145 до 84 мс). Это критически важно для приложений реального времени.
2. Улучшение показателя джиттера: более чем в два раза по сравнению с обоими конкурирующими алгоритмами (с 42 мс при OSPF и 28 мс при ECMP до 12 мс). Низкий джиттер обеспечивает качество видеоконференцсвязи и голосовых вызовов.
3. Снижение потерь пакетов: на 86 % по сравнению с OSPF и на 81 % по сравнению с ECMP. Это достигается за счет проактивного перенаправления трафика в обход перегруженных узлов еще до момента возникновения потерь пакетов.
4. Ускорение адаптации: время сходимости при отказе узла сокращается с 15–30 секунд (OSPF) и 5–10 секунд (ECMP) до менее чем 2 секунд. Это гарантирует минимальное прерывание сервиса.
5. Повышение утилизации: улучшение использования имеющейся пропускной способности на 34 % по сравнению с ECMP (с 85 % до 94 %), что позволяет оптимизировать затраты на облачную инфраструктуру.
6. Стабильность: количество переключений маршрута снижено с 120 в час для OSPF до 8 — для предложенного алгоритма, что указывает на более стабильное и предсказуемое поведение.

Дополнительное тестирование показало, что алгоритм успешно справляется с аномальными ситуациями, такими как синхронное отключение нескольких каналов связи или резкий скачок нагрузки в пиковые часы.

Практическое применение в российских ИТ-компаниях

Внедрение разработанной модели целесообразно для крупных российских холдингов и государственных корпораций, обладающих распределенной филиальной сетью. К числу потенциальных пользователей относятся:

1. Компании банковского сектора, где критична надежность передачи финансовых транзакций в реальном времени;
2. Предприятия энергетического комплекса (РАО, МЭС), требующие отказоустойчивых систем управления;
3. Государственные структуры с высокими требованиями к безопасности и суверенитету данных;
4. Логистические компании, нуждающиеся в оптимизации маршрутов для корпоративных сервисов.

Использование предложенных алгоритмов позволяет:

1. Повысить надежность работы корпоративных сервисов (ERP, CRM, системы управления) при до-

ступе из удаленных регионов за счет гарантирования параметров QoS.
2. Оптимизировать затраты на облачную инфраструктуру за счет более эффективной утилизации арендованных каналов связи (Interconnect). Расчеты показывают, что компании могут сократить расходы на транспортную составляющую на 15–20 %.
3. Обеспечить выполнение требований по защите информации путем автоматического исключения небезопасных маршрутов и соблюдения требований ФЗ-152 и других нормативных актов.
4. Сократить время разрешения инцидентов при сбоях сети за счет быстрой адаптации к изменяющимся условиям.
5. Улучшить пользовательский опыт для конечных пользователей благодаря снижению задержек и потерь при доступе к облачным сервисам.

Рекомендации по внедрению

На основе проведенных исследований предлагаются следующие рекомендации для внедрения предложенного решения:

1. Начальное развертывание рекомендуется на инфраструктуре одного регионального центра обработки данных с параллельным мониторингом и сравнением с существующими решениями.
2. Интеграция с существующей системой управления сетью должна быть выполнена поэтапно, начиная с неприоритетных потоков данных.
3. Настройка параметров алгоритма (α, β, ρ, веса в целевой функции) должна быть адаптирована под специфику конкретного предприятия с учетом типичных паттернов трафика.
4. Требуется обучение администраторов сети основным принципам работы алгоритма и процедурам диагностики при возникновении проблем.
5. Планируется развертывание в облачных платформах российских провайдеров (Yandex Cloud, VK Cloud, SberCloud) через интеграцию с их API управления сетью.

Заключение

В работе представлена комплексная модель и алгоритмы QoS-маршрутизации для глобально распределенных облачных систем, учитывающие специфику российского ИТ-ландшафта и требования регуляторного окружения. Предложенный подход позволяет эффективно решать задачи управления трафиком в условиях миграции на отечественные облачные платформы и неоднородности сетевой инфраструктуры.

Ключевые научные результаты исследования:

1. Разработана математическая модель мультикритериальной маршрутизации с учетом коэффициента суверенности данных, что является инновацией для российского ИТ-сектора;
2. Предложен адаптивный алгоритм на основе муравьиной колонии, интегрированный с системами мониторинга облачных платформ;
3. Экспериментально подтверждена эффективность алгоритма с улучшением ключевых метрик QoS на 40 % и более.

Результаты моделирования подтверждают превосходство разработанного алгоритма над традиционными протоколами маршрутизации по ключевым метрикам качества обслуживания, задержкам, джиттеру и потерям пакетов. Алгоритм демонстрирует высокую адаптивность к динамически меняющимся условиям сети, что критически важно для критически важных корпоративных приложений.

Дальнейшие исследования будут направлены на:

1. Интеграцию алгоритма с механизмами программно-определяемых сетей (SDN) российского производства;
2. Разработку расширений для поддержки протокола IPv6 и современных технологий 5G;
3. Исследование применения методов глубокого обучения (Deep Reinforcement Learning) для дальнейшей оптимизации параметров алгоритма;
4. Проведение натурных экспериментов на реальной инфраструктуре российских облачных провайдеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 5-е изд. — СПб.: Питер, 2020.
2. Tanenbaum A.S., Wetherall D.J. Computer Networks. 5th ed. — Pearson Education, 2011.
3. Смирнов А.С. Анализ производительности сетевых протоколов в распределенных системах // Информационные технологии. — 2021. — Т. 27, № 3. — С. 145–152.
4. Горелов Г.В., Ромашкова О.Н., Чан Т.А. Качество управления речевым трафиком в телекоммуникационных сетях / Москва, Радио и связь, 2001. С.132.
5. Федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ «О персональных данных» // Собрание законодательства РФ. — 2006. — № 31 (1 ч.). — Ст. 3451.
6. Анисимов Д.В. Алгоритмы балансировки нагрузки в кластерах Kubernetes // Системный администратор. — 2023. — № 10. — С. 44–49.
7. Yandex Cloud. Документация по сетевой инфраструктуре [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://cloud.yandex.ru/docs/vpc/ (дата обращения: 21.12.2025).

8. Wang Z., Crowcroft J. Quality-of-service routing for supporting multimedia applications // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. — 1996. — Vol. 14, No. 7. — P. 1228–1234.
9. Петрова А.М., Ромашкова О.Н., Ермакова Т.Н., Чискидов С.В. Модели процессов функционирования информационной системы мониторинга климата и окружающей среды в арктическом регионе // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 4–2. С. 104–110.
10. 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.
11. Ефимов В.В. Особенности построения облачных инфраструктур на базе российских платформ // Вестник связи. — 2023. — № 4. — С. 15–22.

© Титов Дмитрий Андреевич (pointtitov@yandex.ru); Ромашкова Оксана Николаевна (ox-rom@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.45

РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ДОВЕРЕННЫХ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В КРИТИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ ОТРАСЛЯХ

RISK-BASED LIFECYCLE MANAGEMENT MODELS FOR TRUSTED ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS IN CRITICAL SECTORS

S. Tyryshkin
E. Ignatova
P. Parfenov

Summary. In critical sectors, artificial intelligence increasingly becomes part of operational and safety control loops, yet its behavior is shaped not only by software code but also by data, training procedures and the runtime environment. This makes trust assurance non-trivial and calls for a shift from fragmented checks to risk-based lifecycle management. The paper proposes a lifecycle model for trusted AI systems that integrates ISO/IEC 42001-aligned governance (GOST R ISO/IEC 42001-2024), AI system life cycle processes (GOST R 71539-2024), AI risk management guidance (ISO/IEC 23894:2023), the NIST AI RMF 1.0, and AI security practices (MITRE ATLAS, OWASP LLM Top 10). The suggested «evidence-based trust loop» includes criticality classification, stage-specific risk registers, data quality controls, independent validation, drift monitoring and change management. Practical examples from healthcare, energy and financial compliance illustrate how the model reduces hidden failures, model tampering and compliance risks through standardized assurance gates and auditable artifacts.

Keywords: trusted AI, risk management, life cycle, critical infrastructure, audit, verification and validation, data quality, model drift, MLOps, cybersecurity.

Тырышкин Сергей Юрьевич
кандидат технических наук, доцент,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
service.vip-spe@yandex.ru
Игнатова Елена Ивановна
кандидат технических наук, доцент,
Санкт-петербургский государственный морской технический университет
ignatova384756@gmail.com
Парфенов Павел Дмитриевич
Аспирант, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова
i@pparfenov.ru

Аннотация. В критически значимых отраслях искусственный интеллект становится частью контуров управления и безопасности, однако его поведение определяется не только программным кодом, но и данными, обучением и эксплуатационной средой. Это усложняет доказательство доверия и требует перехода от разрозненных проверок к риск-ориентированному управлению жизненным циклом. Цель статьи — обосновать и формализовать модель управления жизненным циклом доверенных ИИ-систем, интегрирующую требования стандартов ГОСТ Р ИСО/МЭК 42001-2024 и ГОСТ Р 71539-2024, рекомендации ISO/IEC 23894:2023 и подход NIST AI RMF 1.0, а также практики обеспечения безопасности ИИ (MITRE ATLAS, OWASP LLM Top 10). Предложена архитектура «контур доказательного доверия», включающая классификацию критичности, риск-регистры по стадиям, контроль качества данных, независимую валидацию, мониторинг дрейфа и управление изменениями. На примерах из здравоохранения, энергетики и финансового комплаенса показано, как модель снижает вероятность скрытых отказов, подмены моделей и регуляторных нарушений за счёт единых «ворот» допуска и измеримых артефактов аудита.

Ключевые слова: доверенный искусственный интеллект, управление рисками, жизненный цикл, критическая инфраструктура, аудит, верификация и валидация, качество данных, дрейф модели, MLOps, информационная безопасность.

Системы искусственного интеллекта (ИИ), используемые в здравоохранении, энергетике, транспорте, финансовом секторе, связи и промышленной автоматизации, всё чаще оказываются встроенными в критически значимые технологические контуры и информационные системы. Для таких контуров характерны повышенные требования к отказоустойчивости, предсказуемости поведения, защите данных и доказуемости соответствия регуляторным требованиям. При этом ИИ-компоненты принципиально отличаются от традиционного программного обеспечения тем, что функциональность определяется не только исходным кодом, но и качеством данных, процедурой обучения, настройками, а также изменчивостью эксплуатационной среды.

Датацентричность и адаптивность повышают эффективность, но одновременно усиливают неопределённость и порождают новые классы рисков: дрейф модели, состязательные воздействия, утечки через параметры, зависимость от внешних наборов данных и библиотек, ошибки в разметке, «скрытые» режимы деградации качества.

В 2023–2026 гг. наблюдается ускорение стандартизации и регулирования доверенного ИИ. На международном уровне развиваются рамки риск-менеджмента и доказательства доверия (NIST AI RMF 1.0) [1], конкретизируются методики анализа угроз для AI-enabled систем (MITRE ATLAS) [2], уточняются риски приложений на основе больших языковых моделей (OWASP LLM Top 10) [3]. В Европейском союзе принят риск-ориентированный правовой режим (Регламент (EU) 2024/1689, AI Act) [4]. В Российской Федерации в 2024–2025 гг. введены национальные стандарты по системе менеджмента ИИ (ГОСТ Р ИСО/МЭК 42001-2024) [5], процессам жизненного цикла ИИ-систем (ГОСТ Р 71539-2024) [6] и структуре жизненного цикла данных (ГОСТ Р 70889-2023) [7]. Сочетание этих документов задаёт нормативную базу, но практический вопрос остаётся открытым: каким образом интегрировать требования менеджмента, инженерных процессов и кибербезопасности в единую модель управления жизненным циклом доверенных ИИ-систем.

Цель статьи — предложить риск-ориентированную модель управления жизненным циклом доверенных ИИ-систем для критически значимых отраслей, объединяющую: 1) процессное описание жизненного цикла; 2) системный контур управления рисками; 3) набор измеримых артефактов, достаточных для аудита; 4) механизм непрерывного контроля эффективности мер в эксплуатации. Научная новизна заключается в формализации «контура доказательного доверия» как интеграции стандартов и практик безопасности ИИ в виде последовательности «ворот» допуска, применимых на всех стадиях — от постановки требований до вывода из эксплуатации.

Обзор публикаций за последние три года позволяет выделить четыре устойчивых направления, определяющих современную повестку доверенного ИИ в критически значимых отраслях.

Первое направление — институционализация риск-ориентированных подходов к ИИ-управлению. В NIST AI RMF риск трактуется как совокупность технических, организационных и социально-правовых последствий, а доверенность связывается с измеримыми характеристиками (надёжность, безопасность, устойчивость, объяснимость, управляемость) и процессами управления на протяжении всего жизненного цикла [1]. Риск-ориентированная логика закрепляется и в правовом поле: в AI Act ключевым механизмом выступает классификация систем по уровню риска, приоритетно регулируя «высокорисковые» применения в критических областях [4].

Второе направление — развитие стандартов, фиксирующих процессы жизненного цикла и управленческую рамку. ISO/IEC 5338:2023 описывает процессы жизненного цикла ИИ-систем [9], а ISO/IEC 23894:2023 предлагает рекомендации по управлению рисками ИИ и интеграции риск-менеджмента в AI-деятельность [10]. Российская адаптация процессного подхода закреплена в ГОСТ Р 71539-2024 [6], а управленческая надстройка — в ГОСТ Р ИСО/МЭК 42001-2024 [5]. Отдельно формализована структура жизненного цикла данных (ГОСТ Р 70889-2023) [7], что принципиально важно для датацентричных систем.

Третье направление — исследования угроз и уязвимостей ИИ-систем. На материалах профильных изданий показано, что атаки и уязвимости затрагивают все уровни: данные, модель, инфраструктуру и процессы эксплуатации [11; 12]. MITRE ATLAS описывает угрозы в терминах тактик и техник, что делает базу пригодной для моделирования угроз и построения сценариев тестирования [2]. OWASP фиксирует типовые риски для приложений на основе LLM по всему жизненному циклу, включая обучение, развёртывание и эксплуатацию [3].

Четвёртое направление — практики сертификации, аудита и формирования доверенных контуров разработки. В отечественной дискуссии развивается концепт «доверенного искусственного интеллекта», связываемый с методиками аудита, качеством разработки и формированием доверенных репозиториев компонентов [8; 17; 21; 22]. Конвергенция управленческих стандартов и инженерных практик безопасности требует прикладной модели, которая связывает эти контуры в единый механизм управления жизненным циклом доверенных ИИ-систем именно для критически значимых отраслей. Эту задачу и решает предлагаемая в статье модель.

Критически значимые отрасли предъявляют к ИИ-системам требования выходящие за рамки точности прогнозов или полноты классификации. В условиях КЗО ключевым становится обеспечение безопасного поведения системы при неопределённости и ошибках. Анализ научных работ и профессиональных рекомендаций позволяет сгруппировать проблемные зоны в три блока.

1) Технический блок: а) уязвимость к состязательным воздействиям на данные и модель; б) деградация качества вследствие дрейфа данных/концепции; в) непрозрачность сложных моделей и трудности проверки корректности; г) риски цепочки поставок (наборы данных, библиотеки, базовые модели) [2; 3; 11; 12; 18; 19].

2) Организационный блок: а) отсутствие единого владельца риска и «сквозной» ответственности за ИИ-компонент; б) разрывы между разработкой и эксплуатацией (DevOps/MLOps), приводящие к неконтролируемым изменениям; в) фрагментарность документации и невозможность воспроизвести обучение и результаты валидации.
3) Регуляторно-правовой блок: а) необходимость классификации системы по уровню риска и соответствия требованиям к высокорисковым применениям [4; 13]; б) выполнение требований к защите персональных данных и к безопасности критической информационной инфраструктуры; в) обеспечение отчётности и готовности к аудиту в рамках отраслевого надзора.

С учётом этих блоков предлагается рассматривать доверие к ИИ-системе как проверяемое свойство, поддерживаемое набором артефактов и процедур. На уровне операционализации доверие удобно описывать через три группы критериев.

1) Свойства безопасности и устойчивости: наличие безопасных режимов, ограничения на автономность, предсказуемые стратегии деградации.
2) Свойства защищённости: устойчивость к атакующим воздействиям, защищённая цепочка поставок, контроль целостности моделей и данных.
3) Свойства управляемости и доказуемости: трассируемость требований и данных, воспроизводимость обучения, независимая валидация, прозрачность и проверяемость решений аудитом.

Эти критерии соотносятся с процессными требованиями ГОСТ Р 71539-2024 [6] и управленческими требованиями ГОСТ Р ИСО/МЭК 42001-2024 [5], а также с практиками NIST AI RMF [1]. На рисунке 1 представлена матрица трассируемости свойств доверия по ключевым стадиям жизненного цикла.

Предлагаемая модель исходит из того, что управлять необходимо не «моделью машинного обучения» как отдельным артефактом, а системой ИИ как совокупностью данных, моделей, программных компонентов, инфраструктуры, организационных процедур и внешних ограничений. В качестве базовой рамки берётся процессное описание жизненного цикла (ГОСТ Р 71539-2024) [6], а в качестве надстройки — система менеджмента ИИ (ГОСТ Р ИСО/МЭК 42001-2024) [5]. Контур управления рисками строится с опорой на ISO/IEC 23894:2023 [10] и NIST AI RMF 1.0 [1] и дополняется практиками обеспечения безопасности ИИ (MITRE ATLAS) [2].

Ключевым элементом модели выступают «ворота допуска» — формализованные контрольные точки, в которых принимается решение о переходе на следующую стадию жизненного цикла на основании доказательных артефактов. Ворота отражают принцип: в критически значимых отраслях недостаточно достичь целевых метрик качества; необходимо доказать приемлемость остаточного риска.

На рисунке 2 показана общая схема риск-ориентированного управления жизненным циклом, включающая восемь стадий и восемь ворот допуска (G0–G7). На каждой стадии формируется набор артефактов, подлежащих аудиту и повторяемой проверке.

Для единообразия оценки предлагается использовать комбинированную метрику приоритета риска, адаптированную к инженерным задачам ИИ-систем:

$$R = P \times I \times D, \quad (1)$$

где P — вероятность реализации сценария (учитывая статистику инцидентов и уязвимости контура), I — тяжесть последствий для безопасности, непрерывности и прав (включая отраслевые требования), D — обнаруживаемость (вероятность выявить деградацию до наступления ущерба). Компонент D особенно важен для ИИ-

Матрица трассируемости свойств доверия по стадиям жизненного цикла

Свойство доверия	Требования	Данные	Модель	ВиВ	Ввод	Эксплуатация
Безопасность (Safety)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Информационная безопасность	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Надёжность и устойчивость	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Объяснимость/ аудитируемость	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Приватность и ПДн	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Недискриминация и качество данных	✓	✓	✓	✓		✓
Управляемость и отказоустойчивость	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Рис. 1. Матрица трассируемости свойств доверия по стадиям жизненного цикла (составлено автором на основе [1; 5–7; 10])



Рис. 2. Риск-ориентированное управление жизненным циклом доверенной ИИ-системы: стадии и ворота допуска (составлено автором на основе [1–3; 5–7; 9–10])

систем из-за латентных отказов и дрейфа, когда метрики ухудшаются постепенно и не фиксируются стандартным мониторингом.

В практической реализации модель предполагает:

1) Классификацию критичности и риск-категории применения (G1): определяются границы допустимого риска, режимы автономности, требования к человеку-в-контуре, а также обязательные артефакты аудита.
2) Управление данными (G2): формируется «паспорт данных» и карта потоков данных; вводятся контроль качества, репрезентативности, правомерности использования, процедуры разметки и контроля смещения. Требования синхронизируются с ГОСТ Р 70889-2023 [7].
3) Управление моделью (G3–G4): обеспечиваются воспроизводимость обучения, контроль версий, защита от подмены и несанкционированной модификации, протоколирование гиперпараметров и сред, независимая валидация и тестирование состязательной устойчивости [11; 12].
4) Управление вводом в эксплуатацию (G5): проводится оценка готовности к эксплуатации, определяется стратегия безопасного отказа, пороговые значения метрик и критерии остановки/отката.
5) Управление эксплуатацией (G6): вводятся мониторинг дрейфа, наблюдаемость, журналирование значимых решений, регулярные переоценки риска и учёт инцидентов; изменения рассматриваются как управляемые релизы с повторным прохождением ворот.
6) Управление выводом из эксплуатации (G7): обеспечивается сохранность доказательных артефактов, корректное прекращение обработки данных, перенос ответственности на резервные контуры и анализ уроков (таблица 1).

Ниже приведены три типовых сценария для критически значимых отраслей, демонстрирующие применение риск-ориентированных ворот допуска и артефактов аудита.

Таблица 1.

Минимальный набор доказательных артефактов по воротам допуска: составлено автором на основе [1–3; 5–7; 9–11]

Ворота	Ключевые артефакты	Опора на стандарты/ практики
G1	Паспорт ИИ-системы; классификация критичности; границы автономности; критерии приемлемости риска	ГОСТ Р ИСО/МЭК 42001-2024; ISO/IEC 23894; NIST AI RMF; AI Act
G2	Паспорт данных; карта потоков; протокол разметки; метрики качества и смещения; правовые основания	ГОСТ Р 70889-2023; ISO/IEC 23894; NIST AI RMF
G3	Репозиторий версий; SBOM/ML-SBOM; протокол обучения; контроль среды; защита целостности	ГОСТ Р 71539-2024; MITRE ATLAS
G4	Отчет ВиВ; тесты робастности; сценарии угроз; отчёт об объяснимости; протокол независимой проверки	NIST AI RMF; OWASP LLM Top 10; MITRE ATLAS
G5	План ввода; критерии отката; пороги метрик; план реагирования на инциденты; обучение персонала	ГОСТ Р ИСО/МЭК 42001-2024; ГОСТ Р 71539-2024
G6	Мониторинг дрейфа; журнал решений; отчеты инцидентов; периодическая переоценка риска; управление изменениями	ГОСТ Р 71539-2024; ISO/IEC 23894; NIST AI RMF
G7	План вывода; архив доказательств; прекращение обработки данных; итоговый отчет об уроках	ГОСТ Р ИСО/МЭК 42001-2024; ГОСТ Р 70889-2023

А) Клиническая поддержка принятия решений (лучевая диагностика). ИИ-модель используется для предварительного триажа исследований и подсказок врачу. Ключевой риск — ложное отрицание при редких патологиях, усиливаемое смещением данных (например, изменение протоколов съёмки) и дрейфом. На стадии G2 обязательна проверка репрезентативности и документирование источников; на G4 — независимая валидация

на отложенных выборках и стресс-тесты на артефакты изображений; на G6 — мониторинг дрейфа по распределениям признаков и по контролируемым подмножествам случаев.

Б) Прогнозирование аварийных режимов в энергосистеме. Модель прогнозирует вероятность перегрузки и рекомендует переключения. Риски носят системный характер: ошибка может привести к каскадному эффекту и нарушению непрерывности. Поэтому на G1 фиксируются границы автономности: рекомендации допускаются только при наличии подтверждения диспетчером, а в системе предусмотрены безопасные сценарии отказа. На G5 и G6 ключевыми становятся наблюдаемость, журналирование решений и процедуры быстрого отключения ИИ-компонента с переходом на регламентные алгоритмы.

В) Комплаенс-контур банка (скрининг санкций и противодействие отмыванию). Применение LLM для извлечения атрибутов и первичной классификации документов ускоряет обработку, но повышает риск галлюцинаций и некорректных выводов. В рекомендациях регулятора акцентируются принципы прозрачности, безопасности и ответственного управления рисками, а также необходимость регулярной проверки качества ИИ и соблюдения конфиденциальности персональных данных [14]. Отраслевые обзоры отмечают рост внедрений ИИ и необходимость более зрелого выбора сценариев и инфраструктуры, включая требования к комплаенсу и стоимости владения [15]. OWASP-классы рисков (внедрение вредоносных инструкций, небезопасная обработка выходных данных, цепочка поставок программного обеспечения) удобны как чек-лист для построения тестов на G4 и процедур мониторинга на G6 [3] (таблица 2).

Предложенная модель ориентирована на практическую применимость в организациях, эксплуатирующих ИИ-системы как часть критических контуров. Её внедрение требует решения трёх методических вопросов.

Во-первых, необходимо согласовать шкалы вероятности и последствий для разнородных рисков (технических, организационных, правовых). Стандарты системы менеджмента ИИ задают общую логику управления рисками, но не определяют отраслевые критерии; поэтому целесообразно формировать отраслевые профили риска и «каталоги контролей» по типам систем (медицинские решения, диспетчерские контуры, скоринговые модели).

Во-вторых, важно обеспечить измеримость и воспроизводимость доказательств. В критических отраслях аудит должен опираться на артефакты, которые можно проверить независимо: версии данных и моделей, протоколы обучения, результаты тестов, журналы решений, метрики дрейфа. Развитие практик threat-informed defense для ИИ и инженерная детализация сценариев атак становятся практической опорой для построения тестов на устойчивость и для расследования инцидентов [23].

В-третьих, требуется выстроить управление изменениями как управляемые релизы. Любая модификация данных, базовой модели, библиотек или параметров развёртывания должна трактоваться как потенциальное изменение уровня риска и, следовательно, как причина повторного прохождения соответствующих ворот допуска. Именно этот принцип переводит «доверие» из декларации в управляемое свойство.

В целом модель соответствует тенденции перехода от «проверки качества модели» к управлению рисками всей ИИ-системы и её окружения. Наличие в России стандартов ГОСТ Р ИСО/МЭК 42001-2024 и ГОСТ Р 71539-2024 создаёт базу для институционализации таких практик, а интеграция с MITRE ATLAS и OWASP LLM Top 10 позволяет учитывать современный ландшафт угроз.

Таблица 2.

Фрагмент риск-регистра по стадиям жизненного цикла (пример): составлено автором по материалам [1–3; 6–7; 11–12; 14–15]

Сценарий риска	Отрасль	Стадия	P (1–5)	I (1–5)	Ключевые меры/артефакты
Смещение данных из-за смены протокола диагностики ⟶ рост ложных отрицаний	Здравоохранение	G2/G6	3	5	Паспорт данных; независимая валидация; мониторинг дрейфа; пороги остановки
Подмена/модификация модели в контуре развёртывания	Энергетика	G3/G5	2	5	Контроль целостности; подписанные артефакты; ограничение прав; проверка в воротах
Внедрение вредоносных инструкций через внешние документы ⟶ искажение извлечённых атрибутов	Финансы	G4/G6	4	4	Тесты OWASP LLM; фильтрация входов/выходов; журналирование; человек-в-контуре
Деградация качества вследствие сезонности и изменения режима нагрузки	Транспорт	G6	3	4	Дрейф-метрики; переоценка риска; управляемые релизы; план отката

Риск-ориентированное управление жизненным циклом доверенных ИИ-систем является необходимым условием безопасного внедрения ИИ в критически значимые отрасли. В статье показано, что актуальные тенденции — стандартизация жизненного цикла, риск-ориентированное регулирование и развитие практик безопасности ИИ — могут быть объединены в единую модель «контура доказательного доверия».

Практическая ценность предложенной модели заключается в том, что модель:

1) формализует ворота допуска G0–G7 и минимальный набор аудируемых артефактов;
2) интегрирует управление данными, моделью и эксплуатацией в единый риск-контур;
3) снижает вероятность латентных отказов и атак за счёт независимой валидации и мониторинга дрейфа;
4) обеспечивает готовность к отраслевому и внутреннему аудиту благодаря воспроизводимости доказательств.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку отраслевых профилей рисков и эталонных каталогов контролей для конкретных классов высокорисковых ИИ-систем, а также на методики количественной оценки эффективности мер (включая экономическую оценку остаточного риска).

ЛИТЕРАТУРА

1. Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0). NIST AI 100-1. January 2023. — URL: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ai/nist.ai.100-1.pdf (дата обращения: 20.02.2026).
2. MITRE ATLAS™ (Adversarial Threat Landscape for Artificial-Intelligence Systems). — URL: https://atlas.mitre.org/ (дата обращения: 20.02.2026).
3. OWASP Top 10 for Large Language Model Applications (2023–2025). — URL: https://owasp.org/www-project-top-10-for-large-language-model-applications/ (дата обращения: 20.02.2026).
4. AI Act: Regulatory framework on artificial intelligence (Regulation (EU) 2024/1689). European Commission. — URL: https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/regulatory-framework-ai (дата обращения: 20.02.2026).
5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 42001-2024. Искусственный интеллект. Система менеджмента. — URL: https://protect.gost.ru/document1.aspx?control=31&baseC=6&id=263961 (дата обращения: 20.02.2026).
6. ГОСТ Р 71539-2024 (ИСО/МЭК 5338:2023). Искусственный интеллект. Процессы жизненного цикла системы искусственного интеллекта. — URL: https://protect.gost.ru/v.aspx?control=8&baseC=6&id=263966 (дата обращения: 20.02.2026).
7. ГОСТ Р 70889-2023 (ИСО/МЭК 8183:2023). Искусственный интеллект. Структура жизненного цикла данных. — URL: https://protect.gost.ru/v.aspx?control=8&baseC=6&id=244522 (дата обращения: 20.02.2026).
8. Аветисян А.И. Доверенный искусственный интеллект // Вестник Российской академии наук. 2024. Т. 94. № 3. С. 200–209. DOI: 10.31857/S0869587324030039.
9. ISO/IEC 5338:2023 Information technology — Artificial intelligence — AI system life cycle processes. — URL: https://www.iso.org/standard/81118.html (дата обращения: 20.02.2026).
10. ISO/IEC 23894:2023 Information technology — Artificial intelligence — Guidance on risk management. — URL: https://www.iso.org/standard/77304.html (дата обращения: 20.02.2026).
11. Котенко И.В., Саенко И.Б., Лаута О.С., Васильев Н.А., Садивников В.В. Атаки и методы защиты в системах машинного обучения: анализ современных исследований // Вопросы кибербезопасности. 2024. № 1(59). С. 24–37. DOI: 10.21681/2311–3456-2024-1-24-37.
12. Легашев Л.В., Жигалов А.Ю. Исследование состязательных атак на регрессионные модели машинного обучения в беспроводных сетях 5G // Вопросы кибербезопасности. 2024. № 3(61). С. 61–67. DOI: 10.21681/2311–3456-2024-3-61-67.
13. Карцхия А.А., Макаренко Г.И. Правовые горизонты технологий искусственного интеллекта: национальный и международный аспект // Вопросы кибербезопасности. 2024. № 1(59). С. 2–14. DOI: 10.21681/2311–3456-2024-1-2-14.
14. Пять принципов для искусственного интеллекта: рекомендации регулятора по применению ИИ. Банк России. 09.07.2025. — URL: https://www.cbr.ru/press/event/?id=25755 (дата обращения: 20.02.2026).
15. ИИ в финтехе — 2025: перспективные сценарии и лучшие практики. Альфа-Банк / T1. Ноябрь 2025. — URL: https://alfabank.st/marketing/d3/2b/marketing/II_v_fintekhe.pdf (дата обращения: 20.02.2026).
16. Росстандарт. Стандарты по направлению «Искусственный интеллект» (перечень действующих ГОСТ). — URL: https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/standarts/aistandarts (дата обращения: 20.02.2026).
17. Намиот Д.Е., Ильюшин Е.А. Доверенные платформы искусственного интеллекта: сертификация и аудит // CyberLeninka. 2024. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/doverennye-platformy-iskusstvennogo-intellekta-sertifikatsiya-i-audit (дата обращения: 20.02.2026).
18. Салов И.В. Угрозы информационной безопасности больших языковых моделей нейросетей // CyberLeninka. 2024. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ugrozy-informatsionnoy-bezopasnosti-bolshih-yazykovyh-modeley-neyrosetey (дата обращения: 20.02.2026).
19. Костогрызов А.И. Анализ угроз злоумышленной модификации модели машинного обучения для систем с искусственным интеллектом // CyberLeninka. 2023. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-ugroz-zloumyshlennoy-modifikatsii-modeli-mashinnogo-obucheniya-dlya-sistem-s-iskusstvennym-intellektom (дата обращения: 20.02.2026).

20. Будко Д.В. Концепция риск-ориентированного подхода в условиях развития технологий искусственного интеллекта // CyberLeninka. 2024. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-risk-orientirovannogo-podhoda-v-usloviyah-razvitiya-tehnologiy-iskusstvennogo-intellekta (дата обращения: 20.02.2026).
21. Билятдинов К.З. Управление качеством разработки отечественных систем доверенного искусственного интеллекта // CyberLeninka. 2025. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-kachestvom-razrabotki-otechestvennyh-sistem-doverennogo-iskusstvennogo-intellekta (дата обращения: 20.02.2026).
22. Намиот Д.Е. Об оценке доверия к системам искусственного интеллекта // CyberLeninka. 2025. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ob-otsenke-doveriya-k-sistemam-iskusstvennogo-intellekta (дата обращения: 20.02.2026).
23. Secure AI with Threat-Informed Defense (v2). MITRE CTID. 09.05.2025. — URL: https://ctid.mitre.org/blog/2025/05/09/secure-ai-v2/ (дата обращения: 20.02.2026).
24. Искусственный интеллект обрел Кодекс этики на финансовом рынке // ComNews. 11.07.2025. — URL: https://www.comnews.ru/content/240125/2025-07-11/2025-w28/1008/iskusstvennyy-intellekt-obrel-kodeks-etiki-finansovom-rynke (дата обращения: 20.02.2026).

© Тырышкин Сергей Юрьевич (service.vip-spe@yandex.ru); Игнатова Елена Ивановна (ignatova384756@gmail.com);
Парфенов Павел Дмитриевич (i@pparfenov.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.47

СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИСТОРИЧЕСКОГО ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

A MODERN APPROACH TO BUILDING PREDICTIVE MODELS BASED ON HISTORICAL OPERATING EXPERIENCE OF INDUSTRIAL EQUIPMENT

A. Chesalov

Summary. The digital transformation of industry, the transition to a data economy, and the imperative of technological sovereignty necessitate the development and implementation of intelligent systems for predictive and prescriptive maintenance. Predictive models based on the analysis of accumulated historical operating experience of industrial equipment are becoming a key element of such systems. This article explores a modern approach for creating, training, and operating such models. It discusses a convergent architecture that combines the Industrial Internet of Things, edge artificial intelligence, cloud computing, and cognitive systems. Particular attention is paid to methodological approaches to working with uncertain and contradictory historical data based on the Dempster-Shafer evidence theory, as well as to the prospects for integrating large-scale language models. It is concluded that the synergy of these technologies forms the basis for creating self-learning industrial ecosystems capable of continuously accumulating and leveraging operational experience.

Keywords: predictive maintenance, predictive models, Dempster-Shafer theory.

Чесалов Александр Юрьевич
кандидат технических наук, генеральный директор, ООО «Программные системы Атлансис», г. Тверь
achesalov@mail.ru

Аннотация. Цифровая трансформация промышленности, переход к экономике данных и императив технологического суверенитета обуславливают необходимость разработки и внедрения интеллектуальных систем прогнозируемого и предписывающего обслуживания. Ключевым элементом таких систем становятся предсказательные модели, основанные на анализе накопленного исторического опыта эксплуатации промышленного оборудования. В статье исследуется современный подход, обеспечивающий создание, обучение и эксплуатацию таких моделей. Рассматривается конвергентная архитектура, объединяющая технологии промышленного Интернета вещей, периферийного искусственного интеллекта, облачных вычислений и когнитивных систем. Особое внимание уделяется методологическим подходам к работе с неопределенными и противоречивыми историческими данными на основе теории свидетельств Демпстера-Шафера, а также к перспективам интеграции больших языковых моделей. Делается вывод о том, что синергия перечисленных технологий формирует основу для создания самообучающихся промышленных экосистем, способных к непрерывному накоплению и использованию операционного опыта.

Ключевые слова: прогнозируемое обслуживание, предсказательные модели, теория Демпстера — Шафера.

Введение

Современный этап развития промышленности характеризуется переходом от стратегий реактивного и профилактического обслуживания к проактивным моделям, основанным на данных. Эффективность прогнозируемого (англ. Predictive Maintenance, PdM) и предписывающего обслуживания (англ. Prescriptive Maintenance) напрямую зависит от способности системы извлекать знания из массива исторических данных, накопленных в ходе эксплуатации оборудования: журналов телеметрии, отчетов о ремонтах, результатов предыдущих диагностик, метаданных об условиях работы. Однако создание надежных предсказательных моделей на этой основе сопряжено с рядом вызовов: высокой неопределенностью и конфликтностью данных от разнородных сенсоров инфраструктуры промышленного Интернета вещей (англ. Industrial Internet of Things, IIoT), необходимостью обработки в режиме, близком к реальному времени, потребностью в объяснимости и интеграции с устоявшимися производственными системами (например, такими как системой управления производством (MES), системой управления активами предприятия (EAM), системой планирования ресурсами (ERP), система управления качеством продукции (QMS), компьютеризированной системой управления техническим обслуживанием (CMMS) и другими отраслевыми производственными системами) [1, 2, 3, 4].

Целью исследования является анализ и синтез новых информационных технологий, обеспечивающих полный жизненный цикл создания предсказательных моделей — от сбора и верификации исторического опыта эксплуатации промышленного оборудования до их развертывания и непрерывного обновления в контуре промышленной автоматизации, и предложение концептуальной архитектуры соответствующей промышленной системы.

Современный этап цифровой трансформации промышленности, ассоциируемый с концепцией «Индустрии 4.0», характеризуется повсеместным внедрением киберфизических систем, насыщенных сенсорами и средствами генерации данных [5, 6]. Одной из ключевых задач в этом контексте является переход от реактивного и планово-предупредительного обслуживания к прогнозному и предписывающему. Эффективность таких систем напрямую зависит от качества и полноты используемых предсказательных (прогнозных) моделей.

Традиционно эти модели строятся на основе анализа телеметрии, поступающей непосредственно с контролируемого актива. Однако, как показывает практика, значительная доля отказов и деградационных процессов инициируется или усугубляется комплексным влиянием внешних факторов: колебаний температуры и влажности, вибраций от смежного оборудования, электромагнитных помех, качества сырья и человеческого фактора. Игнорирование этого контекста, а также накопленного исторического опыта эксплуатации аналогичного оборудования в сходных условиях, приводит к снижению точности прогнозов и запоздалому реагированию.

Таким образом, актуальной научно-технической проблемой является разработка новых информационных технологий и архитектур, позволяющих создавать и постоянно совершенствовать предсказательные модели за счет интеграции и анализа «прошлого опыта». Под «опытом» понимается совокупность:

- Исторических временных рядов данных с внутренних датчиков оборудования.
- Архивов записей о воздействии внешних факторов среды.
- Базы данных и знаний об инцидентах, отказах, проведенных ремонтах и их эффективности.
- Исторических данных эксплуатации парка однотипного оборудования.

От анализа данных к использованию опыта

Эволюцию предиктивных систем можно разделить на несколько этапов:

1. Ориентированный на управление данными (англ. Data-driven). В нем фокус делается на сборе и анализе больших объемов данных с оборудования. Применяются классические алгоритмы машинного обучения (случайные леса, метод опорных векторов) и статистические методы для выявления корреляций и построения прогнозов. Тем не менее, при таком подходе, опыт систематизируется слабо, модели часто «забывают» прошлые аномалии после переобучения.
2. Модельно-ориентированный (англ. Model-based). Определяется созданием максимально точных цифровых двойников (англ. digital twins), физико-математических моделей, отражающих процессы износа и деградации. Модель калибруется на исторических данных, что является формой учета опыта. Однако такие модели очень сложны в разработке и поддержке для уникального оборудования и плохо адаптируются к новым, ранее не наблюдаемым внешним воздействиям.
3. Опытно-ориентированный (англ. Experience-driven). Новая парадигма, где ядром системы является постоянно пополняемая и структурированная «база опыта». Технологии искусственного интеллекта (ИИ) используются не только для анализа текущих данных, но и для извлечения знаний из исторических прецедентов, их обобщения и переноса на новые условия. Ключевыми технологическими компонентами для реализации этого этапа являются:

- Трансферное обучение (англ. Transfer Learning). Позволяет дообучать модели, созданные на данных одного объекта или в одних условиях, для работы с другим аналогичным объектом, значительно экономя время и данные. Это прямой перенос опыта.
- Федеративное обучение (Federated Learning). Дает возможность совместного обучения модели на данных распределенного парка оборудования без передачи «сырых» данных в центральный узел, сохраняя конфиденциальность и накапливая коллективный опыт.
- Нейросетевые архитектуры с памятью. Рекуррентные нейронные сети (англ. Recurrent neural network, RNN), в частности LSTM (англ. Long Short-Term Memory) и GRU (англ. Gated Recurrent Unit), а также сети с механизмами внимания, способны выявлять долгосрочные временные зависимости и «запоминать» контекст, что критически важно для учета последовательности событий, приведших к отказу в прошлом.
- Метаобучение (англ. Meta-Learning) или «обучение обучению». Алгоритмы, способные быстро адаптироваться к новым задачам на основе небольшого количества примеров, используя знания, извлеченные из решения множества предыдущих схожих задач.

Концепция архитектуры самообучающейся промышленной системы

На основе выполненного анализа предлагается многоуровневая архитектура системы прогнозируемого обслуживания и оценки остаточного срока службы промышленного оборудования, реализующей принципы опыт-ориентированного прогнозирования (Рис. 1).

Рассмотрим подробнее каждый из уровней системы:

1. Слой сбора и агрегации данных. Помимо внутренних датчиков оборудования, интегрируют-



Рис. 1. Архитектура автоматизированной системы прогнозируемого обслуживания и оценки остаточного срока службы промышленного оборудования

ся внешние сенсорные сети (например, микроклимат, вибрация конструкций, данные АСУТП / SCADA-систем смежных процессов). Данные проходят верификацию, нормализацию и синхронизацию во временной шкале.

2. Слой хранения накопленного «опыта». Специализированная база данных или озеро данных, где хранятся не только сырые и очищенные данные, но и размеченные прецеденты (такие как аномалии, отказы, успешные вмешательства и другие), признаки, извлеченные моделями.
3. Слой моделей и анализа (в подсистеме «Инфраструктура моделей и моделей машинного обучения»). Включает ансамбль моделей для:

- Быстрой детекции аномалий. Легковесные модели (например, автоэнкодеры), работающие в режиме реального времени, задачей которых является выявление значимых отклонений от ожидаемого патерна («рассогласования»), аналогично нейрофизиологическому феномену MMN (англ. Mismatch Negativity) [7]. Это триггер для углубленного анализа. Прогнозирования отказов и остаточного срока службы оборудования. Комплексные модели (например, LSTM, градиентный бустинг и другие), использующие текущий контекст и извлеченные из слоя хранения накопленного «опыта» схожие исторические прецеденты для оценки вероятности отказа и остаточного ресурса.
- Модуль трансферного обучения. Отвечает за адаптацию базовых моделей под специфику конкретного экземпляра оборудования на основе его собственной истории эксплуатайии.

4. Слой интерпретации и принятия решений. Визуализирует результаты, предоставляет инженеру объяснимые рекомендации на основе технологий объяснимого искусственного интеллекта (англ. Explainable AI, XAI) со ссылками на схожие исторические случаи и предлагает сценарии прогнозируемого / предписывающего обслуживания. Все новые решения и их результаты обратно фиксируются в слое хранения накопленного «опыта», замыкая цикл самообучения автоматизированной системы прогнозируемого обслуживания.

Таким образом, переход к созданию предсказательных моделей, активно использующих прошлый опыт, является закономерным этапом развития интеллектуальных промышленных систем. Это требует интеграции новых информационных технологий: расширенных сетей промышленного Интернета вещей за счет дополнения их решениями на основе периферийного искусственного интеллекта (англ. Edge AI) [8], методов глубокого обучения с памятью и вниманием, парадигм трансферного и федеративного обучения, а также создания специализированных структур данных для хранения и поиска прецедентов.

Согласно данным исследования [9], внедрение Edge AI позволяет обрабатывать локально до 70 % всех данных, генерируемых устройствами промышленного интернета вещей. Такая организация вычислений способствует снижению энергопотребления, связанного с передачей данных, на величину до 40 %. В результате достигается повышение точности прогнозирования отказов оборудования до 97 % при одновременном сокращении продолжительности незапланированных простоев на 65 %.

Предложенная базовая архитектура предполагает эволюцию систем от простых анализаторов данных к самообучающимся киберфизическим системам, способным накапливать, структурировать и эффективно применять коллективный эксплуатационный опыт в рамках инфраструктуры сетевых предприятий [10, 11]. Это открывает путь к существенному повышению точности прогнозов отказов в работе промышленного оборудования, оптимизации жизненного цикла активов и, в конечном итоге, к созданию устойчивых и адаптивных промышленных экосистем.

Методология построения предсказательных моделей на основе исторических данных

В соответствии с представленной архитектурой (Рис. 1), процесс создания предсказательной модели можно представить как многоуровневый конвейер, реализуемый в рамках конвергентной архитектуры интеллектуальной PdM-системы:

1. Сбор и агрегация исторического и оперативного опыта. На сенсорном и периферийном (Edge) уровнях осуществляется сбор данных с датчиков IIoT (например, вибрация, температура, акустика, ток). Современный тренд — оснащение самих датчиков возможностями предобработки и первичного анализа за счет применения Edge AI, что позволяет снизить нагрузку на сеть и выделять значимые признаки непосредственно у источника. Исторические данные из CMMS (такие как текстовые отчеты, руководства) формируют контекстуальный слой, критически важный для понимания причинно-следственных связей.
2. Преодоление неопределенности исторических данных. Качество исторических данных часто неидеально: возможны пропуски, шумы, противоречивые показания от разных сенсоров. Для формализации и снижения такой неопределенности эффективно применяется математический аппарат теории свидетельств Демпстера-Шафера (англ. Dempster-Shafer theory, DST). В отличие от байесовского подхода, DST не требует априорных вероятностей и позволяет явно моделировать незнание. Развитием этого подхода является использование адаптивного взвешивания свиде-

тельств от разных источников на основе комбинированных метрик, например расстояния Хеллингера (оценка конфликта) и энтропии Денга (мера внутренней неопределенности). Это позволяет строить более робастные модели даже на зашумленных и противоречивых исторических данных [12].

3. Обучение и валидация моделей. На облачном уровне исторические данные, прошедшие этап снижения неопределенности, используются для обучения гибридных моделей машинного обучения. Это могут быть:

- Модели для анализа временных рядов (LSTM, Transformers) — для прогнозирования траектории деградации и оценки остаточного срока службы (англ. Remaining Useful Life) [13].
- Модели классификации и обнаружения аномалий — для идентификации типовых и нетипичных отказов на основе исторических паттернов.
- Перспективным направлением является использование больших языковых моделей (англ. Large Language Model, LLM), например, таких как OpenThinker2-32B, для анализа неструктурированного исторического опыта (текстовые отчеты, записи инженеров) и генерации экспертных заключений или даже фрагментов кода для диагностических алгоритмов [14].

4. Эксплуатация и непрерывное обучение. Обученная модель развертывается в рабочем контуре. При этом важнейшим свойством современной системы является способность к непрерывному дообучению на новых оперативных данных, что позволяет адаптироваться к «дрейфу концепта» — изменению поведения оборудования со временем. Технологии MLOps (англ. Machine Learning Operations) способны обеспечить автоматизацию процессов переобучения, тестирования и развертывания новых версий моделей.
5. Интеграция и предоставление рекомендаций. На интеграционном уровне результаты работы моделей (прогнозы, рекомендации) трансформируются в конкретные предписания для систем управления (MES, CMMS) или персонала. Ключевую роль здесь играет объяснимость — способность системы обосновать свой прогноз, что повышает доверие со стороны специалистов.

К наиболее перспективным направлениям развития технологий построению предсказательных моделей на основе исторического опыта относятся:

1. Биоинспирированные алгоритмы, такие как модели, основанные на феномене потенциала негативности рассогласования, способные фоново обнаруживать неизвестные ранее аномалии, обучаясь только на данных о «нормальном» состоянии.
2. Нейроморфные вычисления для реализации энергоэффективной обработки сенсорных потоков непосредственно на периферии.
3. Квантовые алгоритмы для решения сложных оптимизационных задач при планировании графиков обслуживания на основе многолетнего исторического опыта.
4. Цифровые двойники нового поколения, которые становятся динамическими репозиториями всего исторического опыта жизненного цикла актива, позволяя проводить симуляции и «что-если» анализ для выработки оптимальных предписаний.

Заключение

Создание эффективных предсказательных моделей на основе исторического (накопленного) опыта в современной промышленности перестало быть задачей исключительно в области управления и анализа данных. Это комплексная инженерная проблема, требующая глубоких исследований и синергии новых информационных технологий на всех уровнях: от интеллектуальных сенсоров и алгоритмов работы с неопределенностью до когнитивных систем и методов непрерывной интеграции и поставки моделей машинного обучения. Накопленный исторический опыт эксплуатации превращается в ключевой стратегический актив предприятия. Подходы, рассмотренные в статье, позволяют трансформировать опыт, знания и предписания, формируя основу для перехода к автономным, интеллектуальным производствам и реализации принципов Индустрии 4.0, с перспективой перехода к Индустрии 5.0. Дальнейшие исследования должны быть сфокусированы на повышении уровня автономности таких систем, углублении методов объяснимого ИИ для критических решений и создании стандартизированных отраслевых платформ для обмена анонимизированным историческим опытом в рамках безопасных промышленных экосистем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галкин Д.И., Чесалов А.Ю. Перспективы цифровой трансформации производителей оборудования неразрушающего контроля на примере опыта НИИИН МНПО «СПЕКТР» // XXIII Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике «Умные технологии НК. Единство теории и практики»: сб. тр. Москва, 23–25 октября 2023 г. С. 187–170. — М.: Издательский дом «Спектр», 2023. — С. 167–170.
2. Палюх Б.В., Чесалов А.Ю. Методологический подход к цифровой трансформации предприятий отрасли производителей оборудования неразрушающего контроля // «Инжиниринг предприятий и управление знаниями» (ИП&УЗ — 2023) сборник научных трудов XXVI Российской научной конференции. 29–30 ноября 2023 г. / под науч. ред. д.э.н. Ю.Ф. Тельнова. — Москва: ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова», 2023. — С. 256–260.
3. Галкин Д.И., Ефимов А.Г., Чесалов А.Ю. Перспективы создания цифровой инфраструктуры данных в НК // Территория NTD — январь-март — 2024. — С. 62–65.
4. Палюх Б.В., Чесалов А.Ю. Современные подходы к созданию автоматизированных систем прогнозируемого обслуживания многостадийных технологических процессов в промышленности. // «Инжиниринг предприятий и управление знаниями» (ИП&УЗ — 2024): сборник научных трудов XXVII Российской научной конференции. 28–29 ноября 2024 г. Том 1. / под науч. ред. д.э.н. Ю.Ф. Тельнова. — Москва: ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова», 2024. — С. 351–357.
5. Чесалов А.Ю. Применение прорывных технологий искусственного интеллекта в промышленных экосистемах Индустрии 4.0. // Перспективные интеграционные процессы в мировой экономике: нооподход / Сборник материалов IX Санкт-Петербургского международного экономического конгресса (СПЭК-2024) / Под общ. ред. С.Д. Бодрунова. Том 2. — М.: ИНИР им. С.Ю. Витте, 2024. — С. 176–184.
6. Чесалов А.Ю. Перспективы развития автоматизированных систем прогнозируемого обслуживания в промышленности на основе технологий искусственного интеллекта. // «Развитие современной науки и технологий в условиях трансформационных процессов», (2025, Москва): сборник материалов XXXII Международной научно-практической конференции (шифр — МКНТ 32). Москва, 12 июня 2025 г. — Издательство «Знание-М», 2025. — С. 47–55
7. Чесалов А.Ю. Применение искусственного интеллекта для реализации алгоритмов потенциала негативности рассогласования в промышленных автоматизированных системах прогнозируемого обслуживания // Открытое образование. 2025; 29(3): 11–21. https://doi.org/10.21686/1818-4243-2025-3-11-21.
8. Чесалов А.Ю. Тенденции развития периферийного искусственного интеллекта в автоматизации технологических процессов // Автоматизация в промышленности. — 2025. — №7. — С. 9–14.
9. Mohammed A. H. Real-time data processing in cloud and edge computing // International Journal of Computer Engineering and Technology (IJCET). 2024. Vol. 15. Issue 6. pp. 1940–1951.
10. Тельнов Ю.Ф., Казаков В.А., Данилов А.В., Денисов А.А. Требования к программной реализации системы Индустрии 4.0 для создания сетевых предприятий // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 4. С. 557–571. DOI: 10.15827/0236-235X.140.557-571
11. Тельнов Ю.Ф., Казаков В.А., Данилов А.В., Брызгалов А.А. Разработка моделей производственных и бизнес-процессов сетевых предприятий на основе многоагентных систем // Программные продукты и системы. 2023. №4. С. 632–643. doi: 10.15827/0236-235X.142.632-643
12. Чесалов А.Ю. Математическая модель снижения неопределенности на основе теории свидетельств Демпстера–Шафера на уровне сбора данных в автоматизированных системах прогнозируемого обслуживания // Динамика сложных систем — XXI век. — 2025. Т. 19. № 4. С. 62–74. DOI: 10.18127/j19997493-202504–07.
13. Fuhui Wu,Qingbo Wu, Yusong Tan, Xinghua Xu. Remaining Useful Life Prediction Based on Deep Learning: A Survey. [Электронный ресурс]. www.mdpi.com — URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/24/11/3454 (дата обращения: 02.04.2025).
14. Чесалов А.Ю. Анализ возможности применения модели OpenThinker2-32B в автоматизированных системах прогнозируемого обслуживания для малых и средних промышленных предприятий // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. — 2025. Т. 27. № 5. С. 56–70. DOI: https://doi.org/10.18127/j19998554-202505-07.

© Чесалов Александр Юрьевич (achesalov@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.02

ДИАГНОСТИКА ОСТРОГО МИЕЛОИДНОГО ЛЕЙКОЗА, НАРУШЕНИЯ РЕГУЛЯЦИИ МИКРОРНК

DIAGNOSIS OF ACUTE MYELOID LEUKEMIA MICRORNA DYSREGULATION

E. Belova
M. Orlina
A. Kogan
T. Muratova

Summary. MicroRNAs play an important role among non-coding RNAs in the regulation of cellular levels of numerous unrelated microRNAs, which leads to the emergence of new genes. Dysregulation of microRNA synthesis mechanisms—which act as regulators of protein synthesis—is one of the main causes of oncogenesis. Since microRNAs can function both as oncogenes and as tumour suppressors, studying their regulatory mechanisms and applying knowledge about microRNAs in the diagnosis and treatment of cancer diseases is highly relevant and has significant practical value for the advancement of medicine.

Keywords: small RNAs, RNA interference (RNAi), double-stranded RNA (dsRNA), RNA editing, oncogenesis.

Белова Елена Владимировна
кандидат медицинских наук, доцент,
ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова;
ЧУООВО Московский Медицинский Университет Реавиз
ms.ekochina@mail.ru
Орлина Маргарита Анатольевна
кандидат биологических наук, доцент,
ЧУООВО Московский Медицинский Университет Реавиз
m-orlina@yandex.ru
Коган Анастасия Сергеевна
ЧУООВО Московский Медицинский Университет Реавиз
9160999378@mail.ru
Муратова Татьяна Евгеньевна
ЧУООВО Московский Медицинский Университет Реавиз
vip.muratova1@mail.ru

Аннотация. МикроРНК играют важную роль среди некодирующих РНК в процессах регуляции клеточного уровня большого числа неродственных микроРНК, что приводит к возникновению новых генов. Нарушение механизмов регуляции синтеза микроРНК, которые являются регуляторами синтеза белков — одна из главных причин онкогенеза. Поскольку функционирование микроРНК возможно в качестве онкогена и супрессора развития опухоли, изучение механизмов регуляции, применение знаний о микроРНК при диагностике и лечении онкозаболеваний имеет высокую актуальность и практическую значимость для развития медицины.

Ключевые слова: малые РНК, интерференция РНК (РНКи), двунитевая РНК (днРНК), редактирование РНК, онкогенез.

В настоящее время исследования эпигенетических изменений имеют большое значение в изучении и понимании канцерогенеза. Совершаемые открытия в области эпигенетики привели к изменению о детерменантах процесса. [3,5,8] Не вызывает сомнения тот факт, что появление злокачественных новообразований в организме связано с изменениями в структуре генов и взаимодействием трансформированных клеток с окружающими их компонентами стромы. [1–6]

Эпигенетические изменения не оказывают влияния на сами генетические потенции генов и их структуру, однако их экспрессия наследуема, хотя и потенциально обратима.[4,5,7,8] Некоторыми авторами описана корреляция эпигенетических и генетических событий, их способность к провокации и формированию опухолевых процессов.[2, 5, 10–14]

МикроРНК — это обширный класс некодирующих белок РНК, который играет большую роль в посттранскрипционной регуляции, как негативные регуляторы экспрессии гена, обладающий тканевой специфичностью.[9]

Применение знаний о микроРНК при диагностике и лечении онкозаболеваний имеет практическую значимость для развития медицины.

Цель работы: изучение механизмов нарушения регуляций микроРНК и их значимость в диагностике острого миелоидного лейкоза (ОМЛ).

Основные задачи, которые требовалось изучить:

- Проанализировать и оценить механизмы нарушения регуляций микроРНК при онкологических заболеваниях;
- Провести анализ полученных данных и оценить значимость микроРНК в диагностике ОМЛ.

Объект исследования — молекулярная сеть клеток положительной по негомологичной реципрокной

транслокации *t* (8;21) (*q*22; *q*22) формы ОМЛ, включающая в себя микроРНК hsa-mir-3187.

Предмет исследования — топологическое положение в молекулярной сети и функциональная роль микроРНК hsa-mir-3187 по транслокации *t* (8;21) (*q*22; *q*22) формы ОМЛ.

Материалы и методы исследования

Для выполнения исследования были использованы методы статистического анализа и биологической информатики, а различия уровней экспрессии идентифицированы разными методами (Northern blot, real-time RT-PCR, с применением компьютерный расчета).

МикроРНК играющие важную роль среди некодирующих РНК, представлены регуляторными РНК длиной 19–24 н., которые образуются из длинных предшественников в 70-100 н., имеющих структуру «стебель-петля» (рис. 1). Путем последовательного процессинга с участием пептидных комплексов из первичных транскриптов образуются зрелые микроРНК. [2, 8]

Подавление трансляции и деградации мРНК-мишени связано с образованием микроРНК несовершенного дуплекса с участками 3'-нетранслируемых областях и мРНК в составе комплекса RISC.

Независимо от того, в каком виде собраны гены — в кластеры или представляют собой самостоятельные транскрипционные единицы, они транскрибируются в составе длинных кэпированных и полиаденированных предшественников.

К образованию таксонспецифических микроРНК может приводить их способность к регуляции клеточного уровня большого числа неродственных мРНК, произошедших из повторов, что в свою очередь приводит к возникновению новых генов. [3]

Функциональная роль микроРНК в нормальных клетках человека

МикроРНК в составе RISC способна комплементарно взаимодействовать с мРНК вызывая в результате чего происходит либо деградация мРНК-мишени при прискутсвии белка Ago, либо репрессия ее трансляции. E [8,12].

Функциональная роль микроРНК при канцерогенезе

Для каждого типа опухоли аберрантно экспрессированы как минимум две микроРНК [5,2]. Функциони-

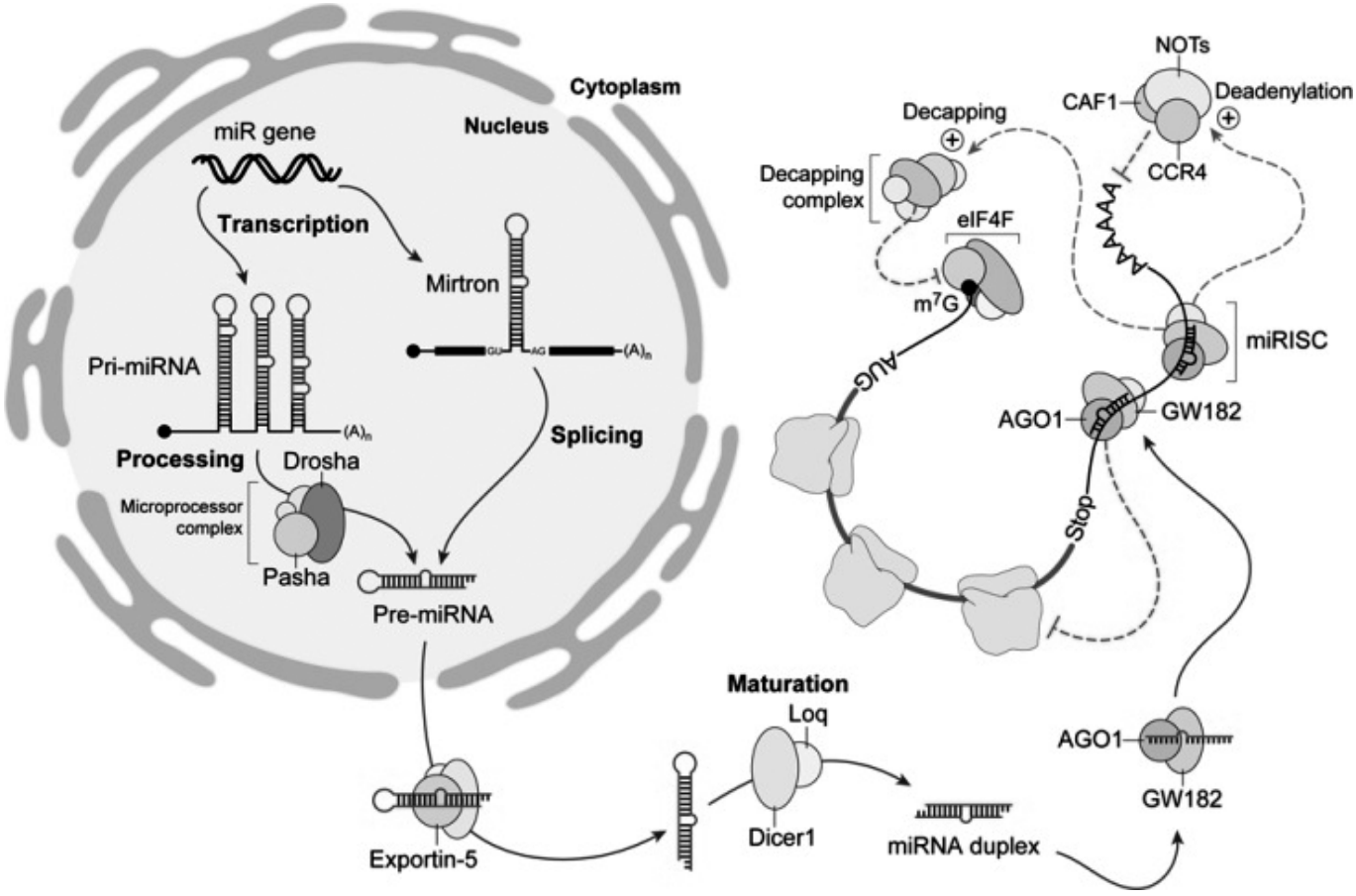


Рис. 1. Механизм действия микроРНК

рование микроРНК возможно в качестве онкогена при повышенной экспрессии, либо в качестве супрессора развития опухоли при сниженной экспрессии.

Снижение количества активных микроРНК в опухолях позволяет сделать вывод о том, что они преимущественно выполняют функцию опухолевых супрессоров. [4,6,7,8] Данные о соотвествии опухоли и микроРНК представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Опухоль	miRNAs
Рак легких	17–92↑, let7↓, 124a↓, 126↓, 143↓, 145↓, 155↑, 191↑, 205↑, 210↑
Рак молочной железы	21↑, 125b↓, 145↓, 155↑
Рак простаты	15a↓, 16–1↓, 21↑, 143↓,145↓
Рак кишечника	19a↑, 21↑, 143↓, 145↓
Рак поджелудочной железы	21↑, 103↑, 107↑, 155v↑
Рак яичника	210↑
Хроническая лимфоцитарная лейкемия	15a↓, 16–1↓, 16–2↑, 23b↑, 24–1↑, 29↓, 146↑, 155↑, 195↑, 221↑, 223↓

Следует отметить, что мутации микроРНК в стволовых и соматических клетках могут играть критическую роль при росте, прогрессии и патофизиологии злокачественных новообразований.

Также следует уделить внимание кластерам микроРНК выступающим в роли онкогена. Кластеры могут содержать и онкогены и супрессоры одновременно.

Острый миелоидный лейкоз (ОМЛ, острый нелимфобластный лейкоз, острый миелогенный лейкоз) — это злокачественная опухоль миелоидного ростка крови, при которой быстро размножаются изменённые белые кровяные клетки. [6,8]

Результаты работы и их обсуждение

Реконструкция генных сетей (графов) межмолекулярных взаимодействий, основанная на подходе «сверху вниз» (top-down approach), носит название деконволюции или построения сети от обратного — от экспрессии генов к их взаимосвязям. Один из алгоритмов построения генной сети таким способом основан на алгоритме деконволюции *ARACNE*2, который имплантирован в многоцелевую платформу *geWorkbench v*.2.4.0 [8]. Идентификация взаимосвязанных генов в данном случае проводится на основе данных микроэрей путем попарного расчета взаимной информации для экспрессирующихся генов по следующей формуле:

$$MI(x,y) = H(x) + H(y) - H(x,y), \quad (1)$$

где x — экспрессия гена X, y — экспрессия гена Y, H — информационная энтропия Шеннона.

Информационная энтропия Шеннона рассчитывается по формуле:

$$H(t) = -\sum_{i=1}^{n} p(t_i) log_2 p(t_i), \quad (2)$$

где t — экспрессия условного гена T, p — вероятность экспрессии гена T на уровне с i-ым значением.

На данном этапе исследований мы ограничились только данными микроэрей, полученными на платформе *GPL*570 и депонированными в базе данных *NCBI GEO*. Суммарно была собрана информация о результатах анализа 106 образцов

Для оценки данных проводилась фоновая коррекция, нормализация, масштабирование и суммирование первичных данных, а также расчет достоверности экспрессии того или иного гена. Фильтрацию низкокачественных микроэрей-проб для алгоритма *ARACNE*2 мы проводили, ориентируясь на результаты расчета достоверности экспрессии генов, проведенного с помощью алгоритма *RMA*. Для расчета взаимной информации мы использовали все гены как хабы, пороговым значением уровня значимости было выбрано значение 1×10^{-7}, толерантность по отношению к непрямым связям была установлена на уровне 10 %, при этом все транскрипционные факторы были исключены из проверки по этому показателю.

Такой подход позволил провести успешную реконструкцию молекулярной сети межгенных взаимодействий в клетках положительной по транслокации *t* (8;21) (*q*22;*q*22) формы ОМЛ. В дальнейшем из глобальной сети была экстрагирована субсеть, центрированная по гену hsa-mir-3187. Графическую реконструкцию, интерпретацию и визуализацию такой сети проводили с помощью программы *Cytoscape* v.2.8.3 [8].

Выводы

- МикроРНК являются прогностическими и диагностическими маркерами при анализе экспрессии генов злокачественной опухоли.
- В результате многих исследований выяснилось, что микроРНК действуют как вспомогательные маркеры, маркеры ранней диагностики, маркеры прогноза и реакции на лечение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азовский Д.И., Афанасьев С.Г., Августинович А.В., Спирина Л.В., Ковалева И.В., Зиннурова А.Б., Белова В.А. Экспрессия микроРНК-34, микроРНК-130, микроРНК-148, микроРНК-181, микроРНК-194 и микроРНК-605 в ткани опухоли ободочной кишки. Южно-Российский онкологический журнал. 2024; 5(1): С.17–24.
2. Белицкий Г.А., Кирсанов К.И., Лесовая Е.А., Якубовская М.Г. Механизмы канцерогенного действия наноматериалов. Успехи молекулярной онкологии 2022;9(4): С. 8–23.
3. Воропаева Е.Н., Березина О.В., Чуркина М.И., Поспелова Т.И., Лызлова А.А., Максимов В.Н. Аберрантная экспрессия и метилирование генов отдельных микроРНК при лимфопролифе ративных заболеваниях: обзор литературы // Journal of Siberian Medical Sciences. 2021. № 4. С. 108–133.
4. Воропаева Е.Н., Поспелова Т.И., Чуркина М.И. и др. Механизмы нарушения экспрессии генов p53-респонсивных микроРНк при диффузной В-крупноклеточной лимфоме. Успехи молекулярной онкологии 2023;10(3): С.72–81.
5. Воропаева Е.Н., Поспелова Т.И., Березина О.В., Чуркина М.И., Гуражева А.А., Максимов В.Н. Метилирование генов p53-респонзивных онкосупрессорных микроРНК при гемобластозах. Сибирский онкологический журнал. 2022; 21(2): С. 130–142.
6. Воропаева Е.Н., Серегина О.Б., Войтко М.С. и др. Значение miR-142 в опухолевой прогрессии диффузной В-клеточной крупноклеточной лимфомы. Онкогематология. 2025;20(2): С. 87–103.
7. Веряскина Ю.А., Титов С.Е., Ковынев И.Б., Федорова С.С., Поспелова Т.И., Жимулёв И.Ф. МикроРНК при миелодиспластическом синдроме. Acta nature. 2 (49) 2021. С. 4–12.
8. А.М. Дейчман, С.В. Зиновьев, А.Ю. Барышников Экспрессия генов и малые РНК в онкологии. Российский биотерапевтический журнал теоретический и научно-практический журнал. С. 107–114.
9. Кашлакова А.И., Сидорова Ю.В., Троицкая В.В., Лукьянова И.А., Исинова Г.А., Кохно А.В., Судариков А.Б., Паровичникова Е.Н., Савченко В.Г. Исследование мутаций генов IDH1, IDH2 при острых миелоидных лейкозах взрослых. Гематология и трансфузиология / Russian journal of hematology and transfusiology (Gematologya i transfusiologiya) /2020; ТОМ 65; №1 149.
10. Осиков М.В., Курносенко И.В., Крюков В.А. Роль микроРНК в регуляции окислительного стресса при эндометриозе // Вестник НовГУ. 2025. 2 (140).
11. Писклова М.В., Баулина Н.М., Киселев И.С., Фаворова О.О. МикроРНК-499а при заболеваниях сердца: перспективы использования в диагностике. Терапевтический архив. 2025;97(4):353–359. ООО «КОНСИЛИУМ МЕДИКУМ», 2025 г.
12. Попандопуло А.Г., Турчин В.В., Солопов М.В., Буше В.В. Проблемы клинических испытаний эффективности клеточной терапии сегодня. Сибирский научный медицинский журнал. 2021; 41 (1): С. 16–32.
13. Kozomara A., Birgaoanu M., Griffiths-Jones S. // Nucl. Acids Res. 2019. V. 8. № 47(D1). P. 155–162.
14. Kang S.H., Choi J.S. // Leuk. Lymphoma. 2019. V. 60. № 11. P. 2779–2786.

© Белова Елена Владимировна (ms.ekochina@mail.ru); Орлина Маргарита Анатольевна (m-orlina@yandex.ru);
Коган Анастасия Сергеевна (9160999378@mail.ru); Муратова Татьяна Евгеньевна vip.muratova1@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.10

СВЯЗЬ ДЕФИЦИТА МЕЛАТОНИНА И ПОЛИМОРФИЗМА ГЕНА MTNR1B С ИСХОДАМИ ЭКО У ЖЕНЩИН С ИДИОПАТИЧЕСКИМ БЕСПЛОДИЕМ

THE ASSOCIATION BETWEEN MELATONIN DEFICIENCY AND MTNR1B GENE POLYMORPHISM WITH IVF OUTCOMES IN WOMEN WITH IDIOPATHIC INFERTILITY

A. Ichmelyan
A. Bogdasarov
L. Davidyan
R. Bogdasarova

Summary. The aim of the study was to evaluate the significance of melatonin deficiency and *MTNR1B* gene polymorphism for the outcomes of assisted reproductive technologies (ART) in women aged 35–45 with idiopathic infertility.

A prospective comparative study (2019–2024, n=239) was conducted. The main group (n=115) comprised patients with melatonin deficiency (nighttime saliva <40 pg/ml), the comparison group (n=124) had normal levels. A comprehensive analysis was performed: melatonin diurnal profile (HPLC-MS), its level in follicular fluid, *MTNR1B* polymorphism (rs1387153), hormonal profile, aromatase activity, IGF-1/IGFBP-3 levels, endometrial immunohistochemistry. Statistics: Mann-Whitney U test, χ^2, Spearman correlation.

The study showed that melatonin deficiency was detected in 48.1 % of patients. Its nighttime level was 3.4 times lower than in the control group (14 [11–17] vs 47 [43–51] pg/ml, p<0.0001), and in follicular fluid it was 41.5 % lower (2.67 [2.24–3.09] vs 4.55 [3.81–5.26] pg/ml, p<0.0001). The main group had a higher basal estradiol level (62.8 [57.5–67.3] vs 58.9 [55.4–61.4] pg/ml, p=0.0002). Melatonin deficiency correlated with insulin resistance (r=–0.254) and inflammatory gynecological pathology (r=–0.246). *MTNR1B* polymorphism was detected in 25.2 % of patients with deficiency and was associated with more frequent insulin resistance (χ^2=8.3, p=0.004).

Thus, the study showed that melatonin deficiency is a common condition associated with metabolic and inflammatory disorders in women with idiopathic infertility. Its combination with *MTNR1B* polymorphism forms an unfavorable phenotype. Assessment of melatonin status and genetic testing are promising for personalizing preparation for repeated IVF attempts.

Keywords: melatonin, melatonin deficiency, *MTNR1B*, polymorphism rs1387153, idiopathic infertility, IVF, insulin resistance.

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
dliana2009@mail.ru
Богдасарова Регина Азатовна
Аспирант,
ГОУ ВПО Ульяновский государственный университет
bogdasarovar@bk.ru

Аннотация. Целью исследования было оценить значимость дефицита мелатонина и полиморфизма гена *MTNR1B* для исходов ВРТ у женщин 35–45 лет с идиопатическим бесплодием.

Проведено проспективное сравнительное исследование (2019–2024 гг., n=239). Основная группа (n=115) — дефицит мелатонина (ночная слюна <40 пг/мл), сравнения (n=124) — нормальный уровень. Проведен комплексный анализ: суточный профиль мелатонина (ВЭЖХ-МС), его уровень в фолликулярной жидкости, полиморфизм *MTNR1B* (rs1387153), гормональный профиль, ароматазная активность, ИФР-1/IGFBP-3, иммуногистохимия эндометрия. Статистика: критерии Манна-Уитни, χ^2, корреляция Спирмена.

Исследования показали, что дефицит мелатонина выявлен у 48,1 % пациенток. Его ночной уровень был в 3,4 раза ниже, чем в контроле (14 [11–17] vs 47 [43–51] пг/мл, p<0,0001), в фолликулярной жидкости — на 41,5 % ниже (2,67 [2,24–3,09] vs 4,55 [3,81–5,26] пг/мл, p<0,0001). В основной группе отмечен более высокий базальный эстрадиол (62,8 [57,5–67,3] vs 58,9 [55,4–61,4] пг/мл, p=0,0002). Дефицит мелатонина коррелировал с инсулинорезистентностью (r=–0,254) и воспалительной гинекологической патологией (r=–0,246). У 25,2 % пациенток с дефицитом выявлен полиморфизм *MTNR1B*, ассоциированный с более частой инсулинорезистентностью (χ^2=8,3, p=0,004).

Таким образом, исследования показали, что дефицит мелатонина — распространенное состояние, связанное с метаболическими и воспалительными нарушениями у женщин с идиопатическим бесплодием. Его сочетание с полиморфизмом *MTNR1B* формирует неблагоприятный фенотип. Оценка мелатонинового статуса и генетическое тестирование перспективны для персонализации подготовки к повторным попыткам ЭКО.

Ключевые слова: мелатонин, дефицит мелатонина, *MTNR1B*, полиморфизм rs1387153, идиопатическое бесплодие, ЭКО, инсулинорезистентность.

В структуре женского бесплодия доля идиопатических (необъяснимых) форм, согласно данным различных национальных и международных регистров, остается стабильно высокой и составляет от 15 до 30 %. Среди пациенток старшего репродуктивного возраста (35–45 лет) этот показатель достигает 35–40 %, что подчеркивает возраст как независимый фактор снижения фертильности даже при формально сохраненной функции яичников [1, 2]. Несмотря на активное применение современных протоколов контролируемой овариальной стимуляции и усовершенствованных лабораторных техник в рамках вспомогательных репродуктивных технологий (ВРТ), частота наступления клинической беременности у этой категории женщин после переноса эмбрионов не превышает 25–30 % даже при удовлетворительных показателях овариального резерва [3, 4]. Данный клинический парадокс актуализирует поиск глубинных, неочевидных причин неудач. Одной из ключевых и наиболее обоснованных патофизиологических гипотез, объясняющих низкую эффективность ВРТ, является теория о накоплении оксидативного стресса в микроокружении ооцита — фолликулярной жидкости, что ведет к повреждению митохондрий, нарушению метаболизма и эпигенетическим изменениям в гаметах, снижая их качество и потенциал к успешному эмбриогенезу [5, 6].

В этом контексте особое научное и практическое значение приобретает мелатонин (МТ) — мультифункциональный индоламин, секретируемый преимущественно эпифизом в циркадном режиме. Он является не только ключевым хронобиотиком, регулирующим сон и сезонные ритмы, но и одним из самых мощных эндогенных антиоксидантов с прямым митохондриопротекторным действием [7, 8]. Важно, что его концентрация в фолликулярной жидкости может в несколько раз превышать таковую в плазме крови за счет локальной продукции клетками гранулезы и кумуляции из кровотока, что подчеркивает его физиологическую роль в защите ооцита от повреждения активными формами кислорода во время критических этапов мейоза и созревания [9, 10]. Экспериментальные и клинические исследования доказали, что добавление мелатонина в культуральные среды для оплодотворения и культивирования эмбрионов улучшает их морфокинетические параметры, снижает частоту фрагментации и повышает жизнеспособность in vitro [11, 12]. Однако данные о клинической значимости именно эндогенного дефицита мелатонина у бесплодных женщин, особенно в сочетании с генетическими особенностями, определяющими чувствительность тканей к его действию, остаются противоречивыми и недостаточно изученными в рамках крупных проспективных исследований.

Особый интерес представляет полиморфизм гена рецептора мелатонина 1B (MTNR1B, rs1387153). Данный генетический вариант прочно ассоциирован с нарушением секреции инсулина бета-клетками поджелудочной железы, повышенным риском развития гестационного диабета и синдрома поликистозных яичников (СПКЯ) [13, 14]. Учитывая тесную патофизиологическую связь между метаболизмом глюкозы, инсулинорезистентностью и овариальной функцией (влияние на стероидогенез, фолликулогенез и качество ооцитов), можно предположить, что данный генетический вариант может опосредованно модулировать репродуктивные эффекты мелатонина, нарушая тонкий баланс энергетического обмена в яичнике [15, 16]. Таким образом, комплексное изучение взаимосвязи между циркадным профилем секреции МТ, генетическим статусом по MTNR1B, ключевыми метаболическими маркерами (ИФР-1, IGFBP-3), ароматазной активностью яичниковой ткани и клиническими исходами ЭКО представляет собой актуальную междисциплинарную задачу, лежащую на стыке репродуктологии, хронобиологии и медицинской генетики. Ее решение позволит выделить новые интегративные прогностические биомаркеры и обосновать целесообразность персонализированной коррекции выявленных нарушений для повышения эффективности лечения возраст-ассоциированного бесплодия.

В проспективное сравнительное открытое исследование в параллельных группах, проведенное с января 2019 по декабрь 2024 гг. (60 месяцев) на базе клиник репродуктивной медицины в г. Краснодар и г. Ульяновск, были включены 239 женщин. Критерии включения были строгими: старший репродуктивный возраст (35-45 лет), диагноз идиопатического бесплодия (исключены трубный, маточный, мужской факторы, тяжелый эндометриоз), наличие сохраненного овариального резерва (уровень АМГ ≥1,0 нг/мл, количество антральных фолликулов на 2–5 день цикла ≥5), а также одна или более предшествующих неудачных попыток ЭКО/ИКСИ с переносом эмбрионов хорошего качества. Из 1578 женщин с диагнозом идиопатического бесплодия, обратившихся в клиники за указанный период, всем критериям соответствовали 276. После исключения 37 пациенток, отказавшихся от участия или выбывших на этапе предварительного обследования, были окончательно сформированы две группы. Основную группу составили 115 женщин (средний возраст 38.7±2.9 лет) с выявленным дефицитом мелатонина (уровень в ночной порции слюны <40 пг/мл). Группу сравнения — 124 женщины (средний возраст 37.9±3.1 лет) с нормальным уровнем мелатонина (≥40 пг/мл). Группы были сопоставимы по возрасту, индексу массы тела, длительности бесплодия и количеству предыдущих неудачных попыток ВРТ.

Всем участницам на этапе планирования нового цикла ЭКО проводился расширенный комплекс лабораторно-инструментальных обследований:

1. Определение суточного профиля мелатонина в слюне (пробы в 07:00, 11:00, 15:00, 19:00, 23:00, 03:00) методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с тандемной масс-спектрометрией (ВЭЖХ-МС/МС), обеспечивающим высокую специфичность. Референсные значения для ночного пика: 20–70 пг/мл.
2. Анализ уровня мелатонина в фолликулярной жидкости, полученной при трансвагинальной пункции доминантных фолликулов, методом электрохемилюминесцентного иммуноанализа (ECLIA).
3. Генетическое тестирование однонуклеотидного полиморфизма MTNR1B rs1387153 (C>T) в образцах буккального эпителия методом полимеразной цепной реакции в реальном времени (ПЦР-РВ) с последующим анализом кривых плавления.
4. Оценка базального гормонального профиля на 2–5 день менструального цикла: ФСГ, ЛГ, эстрадиол (Е2), АМГ, пролактин, ТТГ, кортизол, ДГЭА-С (иммунохемилюминесцентный метод на анализаторе).
5. Расчет косвенных показателей ароматазной активности яичников: интегральный коэффициент (Ка = Е2/АМГ) и фолликулярный коэффициент (Кф = Е2/n антральных фолликулов, где n=5-15).
6. Определение уровней инсулиноподобного фактора роста-1 (ИФР-1) и его основного связывающего белка-3 (IGFBP-3) в сыворотке крови методом иммуноферментного анализа (ИФА).
7. Иммуногистохимическое исследование аспирата эндометрия в период «окна имплантации» (оценка экспрессии рецепторов эстрогена-α (Эα) и прогестерона-А (ПР-А) по полуколичественной системе Allred).
8. Оценка качества полученных ооцитов по стандартным морфологическим критериям, рекомендованным Российским обществом акушеров-гинекологов (версии РАРЧ 2018–2021).

Объем выборки (N=239) был рассчитан априори при мощности исследования 80 % и уровне значимости α=0.05 для выявления ожидаемых различий в основных конечных точках. Для количественных данных, распределение которых соответствовало нормальному (проверка критерием Шапиро-Уилка), применялся t-критерий Стьюдента для независимых выборок (результаты представлены как M±σ). Для данных с ненормальным распределением использовался непараметрический U-критерий Манна-Уитни (результаты представлены как медиана Me [межквартильный размах Q1-Q3]). Анализ качественных (номинальных) переменных проводился с помощью критерия χ^2 или точного критерия Фишера, где это было необходимо. Для оценки силы и направления статистических связей между параметрами использовался коэффициент ранговой корреляции Спирмена (r). Статистическая обработка данных выполнена в программной среде IBM SPSS Statistics 26.0. Порог статистической значимости для всех видов анализа был установлен на уровне $p < 0.05$.

Проведенные исследования позволили выявить высокодостоверные различия ($p < 0.001$) по всем точкам суточного профиля между группами. Пиковая ночная концентрация МТ в слюне в основной группе была в 3.4 раза ниже, чем в группе сравнения: 14 [11–17] пг/мл против 47 [43–51] пг/мл (U=0.5, $p<0.0001$). Уровень МТ в фолликулярной жидкости также оказался существенно ниже — на 41.5 % (2.67 [2.24–3.09] пг/мл против 4.55 [3.81–5.26] пг/мл, U=378.5, $p < 0.0001$). Эти данные не только подтверждают наличие системного дефицита МТ, но и демонстрируют, что он затрагивает и периферические компартменты, включая яичниковый, что потенциально снижает антиоксидантную защиту ооцита на наиболее уязвимом этапе его финального созревания [17, 18, 33].

В основной группе были обнаружены слабые, но статистически значимые отрицательные корреляции между ночным уровнем МТ и антропометрическими (окружность живота, $r=-0.161$, $p<0.05$), метаболическими (наличие синдрома инсулинорезистентности по индексу HOMA-IR, $r=-0.254$, $p=0.005$) и соматическими показателями (неалкогольная жировая болезнь печени, $r=-0.246$, $p=0.007$; хронические воспалительные гинекологические заболевания, такие как сальпингит и эндометрит, $r=-0.246$, $p=0.007$). В группе сравнения аналогичные связи либо отсутствовали, либо имели противоположную, положительную направленность. Это указывает на то, что дефицит МТ у бесплодных женщин интегрирован в комплекс метаболических и воспалительных нарушений, формируя неблагоприятный фон для реализации репродуктивной функции, что согласуется с современными данными о роли МТ в модуляции иммунного ответа, чувствительности периферических тканей к инсулину и состоянии микробиоты [19, 20, 34].

У 25.2 % (29 из 115) пациенток основной группы были идентифицированы гетеро— или гомозиготные генотипы по минорному аллелю Т полиморфизма MTNR1B rs1387153 (C/T или T/T). В этой генетически очерченной подгруппе частота синдрома инсулинорезистентности была достоверно выше ($\chi^2=8.3$, $p=0.004$), что подтверждает связь данного аллельного варианта с нарушением углеводного обмена даже на доклинической стадии, без манифестного сахарного диабета [21, 22]. При этом внутри основной группы наличие полиморфизма MTNR1B не оказывало самостоятельного влияния на уровни АМГ, ФСГ, ЛГ, что свидетельствует о независимом и, возможно, синергичном вкладе собственно дефицита МТ и неблагоприятного генетического фона в патогенез нарушений репродуктивной функции.

При сопоставимых уровнях ФСГ (4.8 [4.4–6.1] vs 5.3 [4.5–6.1] мМЕ/мл, $p=0.203$) и АМГ (2.5 [1.8–3.1] vs 2.7

[2.1–3.2] нг/мл, p=0.129), базальный уровень эстрадиола на 2–3 день цикла был статистически значимо выше в основной группе с дефицитом МТ (62.8 [57.5–67.3] пг/мл против 58.9 [55.4–61.4] пг/мл, p=0.0002). Это может отражать компенсаторное повышение ароматазной активности гранулезных клеток в условиях хронического оксидативного стресса или нарушение механизма отрицательной обратной связи в оси гипоталамус–гипофиз–яичники [23, 35]. Рассчитанный фолликулярный коэффициент (Кф) в основной группе имел тенденцию к увеличению (12.6 [11.5–13.5] пмоль/л на фолликул против 11.8 [11.1–12.3] пмоль/л, p=0.07), что требует дальнейшего изучения на расширенной выборке для подтверждения его прогностической ценности [30].

Уровни ИФР-1 и IGFBP-3 в сыворотке крови не показали достоверных межгрупповых различий (p>0.05). Однако в подгруппе с полиморфизмом MTNR1B отмечалась тенденция к снижению соотношения ИФР-1/IGFBP-3, что может указывать на изменение биодоступности свободного, биологически активного ИФР-1, играющего важную роль в процессе фолликулогенеза и селекции доминантного фолликула [24, 25, 36].

Таким образом, результаты 5-летнего проспективного исследования с участием 239 женщин демонстрируют, что дефицит мелатонина, определяемый как уровень в ночной слюне ниже 40 пг/мл, является клинически значимым и распространенным состоянием, выявляемым у 48.1 % пациенток старшего репродуктивного возраста с идиопатическим бесплодием и неудачными попытками ЭКО в анамнезе. Данное состояние статистически значимо (p <0.01) ассоциировано с комплексом взаимосвязанных нарушений: снижением концентрации МТ в фолликулярной жидкости на 41.5 %, более высоким базальным уровнем эстрадиола (медиана 62.8 пг/мл против 58.9 пг/мл), а также с наличием метаболических (инсулинорезистентность) и воспалительных гинекологических заболеваний, что формирует порочный круг, усугубляющий репродуктивную дисфункцию.

Важным новым аспектом является выявление у каждой четвертой (25.2 %) пациентки с дефицитом МТ полиморфизма гена его рецептора MTNR1B (rs1387153), что формирует особый фенотип с более выраженными нарушениями углеводного обмена на фоне сниженной антиоксидантной защиты. Это подчеркивает необходимость интеграции генетического тестирования в алгоритм углубленного обследования женщин с неудачными попытками ВРТ для стратификации индивидуального риска и понимания механизмов неудачи [37, 38].

Полученные данные обосновывают целесообразность рутинной оценки суточного профиля мелатонина у женщин с необъяснимым бесплодием, особенно после неудачных циклов ВРТ. Персонализированная коррекция выявленного дефицита мелатонина (например, с помощью таймированного приема препаратов мелатонина, хронотерапии, коррекции режима сна и освещенности), с учетом генетического профиля и метаболического статуса, может стать новым перспективным направлением в повышении эффективности лечения возраст-ассоциированного бесплодия [27, 39]. Однако для внедрения таких протоколов в широкую клиническую практику необходимы дальнейшие рандомизированные контролируемые исследования, оценивающие влияние мелатонин-заместительной терапии не только на лабораторные параметры, но и на ключевые клинические исходы — частоту наступления и благополучного течения беременности [40, 41, 42].

ЛИТЕРАТУРА

1. Веропотвелян П.Н., Бурьянов О.А., Грищенко В.И. Идиопатическое бесплодие: современные взгляды на проблему. Репродуктивная эндокринология. 2020;(54):7–15. DOI: 10.18370/2309-4117.2020.54.7–15
2. Practice Committee of the American Society for Reproductive Medicine. Electronic address: asrm@asrm.org. Fertility evaluation of infertile women: a committee opinion. Fertil Steril. 2021;116(5):1255–1265. DOI: 10.1016/j.fertnstert.2021.08.038
3. Сидельникова В.М., Сухих Г.Т., ред. Невынашивание беременности. М.: ГЭОТАР-Медиа; 2021. 592 с.
4. De Geyter C., Wyns C., Calhaz-Jorge C., et al. 20 years of the European IVF-monitoring Consortium registry: what have we learned? A comparison with registries from two other regions. Hum Reprod. 2020;35(12):2832–2849. DOI: 10.1093/humrep/deaa250
5. Agarwal A., Aponte-Mellado A., Premkumar B.J., Shaman A., Gupta S. The effects of oxidative stress on female reproduction: a review. Reprod Biol Endocrinol. 2012; 10:49. DOI: 10.1186/1477-7827-10-49
6. Божедомов В.А., Гамисония М.С., Титченко Ю.П. Окислительный стресс и репродуктивная функция у женщин. Акушерство и гинекология. 2019;(5):13–19. DOI: 10.18565/aig.2019.5.13-19
7. Reiter R.J., Tan D.X., Rosales-Corral S., Galano A., Zhou X.J., Xu B. Mitochondria: Central Organelles for Melatonin's Antioxidant and Anti-Aging Actions. Molecules. 2018;23(2):509. DOI: 10.3390/molecules23020509
8. Жуков В.А., Лебедев М.А., Воробьева Е.В. Мелатонин: новые возможности в клинической практике. Терапевтический архив. 2021;93(3):366–371. DOI: 10 .26442/00403660.2021.03.200709
9. Tamura H., Takasaki A., Taketani T., et al. Melatonin as a free radical scavenger in the ovarian follicle. Endocr J. 2013;60(1):1–13. DOI: 10.1507/endocrj. ej12-0263
10. Voiculescu S.E., Zygouropoulos N., Zahiu C.D., Zagrean A.M. Role of melatonin in embryo fetal development. J Med Life. 2014;7(4):488–492.
11. Tian X., Wang F., Zhang L., et al. Beneficial effects of melatonin on the in vitro maturation of sheep oocytes and its relation to melatonin receptors. Int J Mol Sci. 2017;18(4):834. DOI: 10.3390/ijms18040834

12. Lord T., Martin J.H., Aitken R.J. Melatonin prevents postovulatory oocyte aging in the mouse and extends the window for optimal fertilization in vitro. Biol Reprod. 2013;88(3):67. DOI: 10.1095/biolreprod.112.106450
13. Lyssenko V., Nagorny C.L., Erdos M.R., et al. Common variant in MTNR1B associated with increased risk of type 2 diabetes and impaired early insulin secretion. Nat Genet. 2009;41(1):82–88. DOI: 10.1038/ng.288
14. Kim J.Y., Cheong H.S., Park B.L., et al. Melatonin receptor 1 B polymorphisms associated with the risk of gestational diabetes mellitus. BMC Med Genet. 2011; 12:82. DOI: 10.1186/1471–2350-12-82
15. Карпова Е.А., Дедов И.И., Тюльпаков А.Н. Полиморфизм гена рецептора мелатонина MTNR1B как фактор риска нарушения углеводного обмена. Сахарный диабет. 2017;20(3):200–206. DOI: 10.14341/DM8019
16. Cermisoni G.C., Alteri A., Corti L., et al. Vitamin D and endometrium: A systematic review of a neglected area of research.Int J Mol Sci. 2018;19(8):2320. DOI: 10.3390/ijms19082320
17. Nakamura Y., Tamura H., Takayama H., Kato H. Increased endogenous level of melatonin in preovulatory human follicles does not directly influence progesterone production. Fertil Steril. 2003;80(4):1012–1016. DOI: 10.1016/s0015-0282(03)01008-3
18. He C., Wang J., Zhang Z., et al. Mitochondria synthesize melatonin to ameliorate its function and improve mice oocyte's quality under in vitro conditions. Int J Mol Sci. 2016;17(6):939. DOI: 10.3390/ijms17060939
19. Hardeland R. Melatonin and inflammation-Story of a double-edged blade. J Pineal Res. 2018;65(4): e12525. DOI: 10.1111/jpi.12525
20. McMullan C.J., Schernhammer E.S., Rimm E.B., Hu F.B., Forman J.P. Melatonin secretion and the incidence of type 2 diabetes. JAMA. 2013;309(13):1388–1396. DOI: 10.1001/jama.2013.2710
21. Prokopenko I., Langenberg C., Florez J.C., et al. Variants in MTNR1B influence fasting glucose levels. Nat Genet. 2009;41(1):77–81. DOI: 10.1038/ng.290
22. Бондарь И.А., Кузник Н.С., Тарасова М.А. Ассоциация полиморфизма гена рецептора мелатонина MTNR1B с инсулинорезистентностью и нарушениями репродуктивной функции. Проблемы репродукции. 2019;25(5):76–82. DOI: 10.17116/repro20192505176
23. Devine K., Mumford S.L., Wu M., et al. Diminished ovarian reserve in the United States assisted reproductive technology population: diagnostic trends among 181,536 cycles from the Society for Assisted Reproductive Technology Clinic Outcomes Reporting System. Fertil Steril. 2015;104(3):612–619.e3. DOI: 10.1016/j.fertnstert.2015.05.017
24. Giudice L.C. Insulin-like growth factors and ovarian follicular development. Endocr Rev. 1992;13(4):641-669. DOI: 10.1210/edrv-13-4-641
25. Овсянникова Т.В., Карева Е.Н., Кветная Т.В. Роль системы инсулиноподобного фактора роста в регуляции овариального резерва. Акушерство и гинекология. 2018;(1):5-10. DOI: 10.18565/aig.2018.1.5-10
26. Gaskins A.J., Rich-Edwards J.W., Hauser R., et al. Prepregnancy dietary patterns and risk of pregnancy loss. Am J Clin Nutr. 2014;100(4):1166–1172. DOI: 10.3945/ajcn.114.089631
27. Fernando S., Wallace E.M., Vollenhoven B., et al. Melatonin in assisted reproductive technology: A pilot double-blind randomized placebo-controlled clinical trial. Front Endocrinol (Lausanne). 2018; 9:545. DOI: 10.3389/fendo.2018.00545
28. Иванец Т.Ю., Корнеева И.Е., Назаренко Т.И. Возможности иммуногистохимического исследования эндометрия у пациенток с неудачными попытками ЭКО. Проблемы репродукции. 2020;26(3):64–71. DOI: 10.17116/repro20202603164
29. Chuffa L.G.A., Lupi-Júnior L.A., Costa A.B., Amorim J.P.C., Seiva F.R.F. The role of melatonin in targeting cell signaling pathways in reproduction. Neuroendocrinology. 2019;109(2):163–171. DOI: 10.1159/000497577
30. Шурлыгина А.В., Поляков Д.А., Савочкина М.В. и др. Оценка ароматазной активности яичников как предиктор ответа на стимуляцию овуляции в программах ЭКО. Акушерство, гинекология и репродукция. 2022;16(1):27–36. DOI: 10.17749/2313-7347/ob.gyn.rep.2022.296
31. Patel S., Kilburn B., Imudia A., Armant D.R., Skafar D.F. Estradiol elicits proapoptotic and antiproliferative effects in human trophoblast cells. Biol Reprod. 2015;93(3):74. DOI: 10.1095/biolreprod.115.129601
32. Громова О.А., Торшин И.Ю., Лиманова О.А. и др. Витамин D и репродуктивное здоровье: молекулярные и эпидемиологические аспекты. Вопросы гинекологии, акушерства и перинатологии. 2016;15(3):5–15.
33. Jiki Z., Lecour S., Nduhirabandi F. Cardiovascular Benefits of Dietary Melatonin: A Myth or a Reality? Front Physiol. 2018; 9:528. DOI: 10.3389/fphys.2018.00528
34. Reiter R.J., Tan D.X., Galano A. Melatonin: Exceeding Expectations. Physiology (Bethesda). 2014;29(5):325–333. DOI: 10.1152/physiol.00011.2014
35. Ruder E.H., Hartman T.J., Reindollar R.H., Goldman M.B. Female dietary antioxidant intake and time to pregnancy among couples treated for unexplained infertility. Fertil Steril. 2014;101(3):759–766. DOI: 10.1016/j.fertnstert.2013.11.008
36. Oktem O., Akin N., Bildik G., et al. FSH Stimulation promotes progesterone synthesis and output from human granulosa cells without luteinization. Hum Reprod. 2017;32(3):643–652. DOI: 10.1093/humrep/dew358
37. Lispi M., Simon A., Alviggi C., et al. The role of polymorphisms in melatonin receptor 1 genes on the assisted reproduction outcome: a systematic review and meta-analysis. Eur Rev Med Pharmacol Sci. 2021;25(24):7875–7885. DOI: 10.26355/eurrev_202112_27627
38. Бахарева И.В., Леонов Б.В., Кан Н.Е. Генетические предикторы эффективности программ вспомогательных репродуктивных технологий. Акушерство и гинекология. 2022;(3):36–42. DOI: 10.18565/aig.2022.3.36-42
39. Claustrat B., Leston J. Melatonin: Physiological effects in humans. Neurochirurgie. 2015;61(2–3):77–84. DOI: 10.1016/j.neuchi.2015.03.002
40. Espino J., Macedo M., Lozano G., et al. Impact of Melatonin Supplementation in Women with Unexplained Infertility Undergoing Fertility Treatment. Antioxidants (Basel). 2019;8(9):338. DOI: 10.3390/antiox8090338
41. Pacchiarotti A., Carlomagno G., Antonini G., Pacchiarotti A. Effect of myo-inositol and melatonin versus myo-inositol, in a randomized controlled trial, for improving in vitro fertilization of patients with polycystic ovarian syndrome. Gynecol Endocrinol. 2016;32(1):69–73. DOI: 10.3109/09513590.2015.1101444
42. Колода Ю.А., Назаренко Т.А., Крапостина К.И. Современные подходы к прегравидарной подготовке и сопровождению беременности у пациенток с неудачными попытками ЭКО в анамнезе. Акушерство и гинекология. 2023;(1):34–41. DOI: 10.18565/aig.2023.1.34-41

© Ичмелян Альберт Мисакович (ichmelyan@rambler.ru); Богдасаров Азат Юрьевич (azat-01@mail.ru);
Давидян Лиана Юрьевна (dliana2009@mail.ru); Богдасарова Регина Азатовна (bogdasarovar@bk.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.12

ИНТЕРАКТИВНЫЙ ОПРОС И ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ВРАЧЕБНЫХ РЕШЕНИЙ В ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКЕ ЗАБОЛЕВАНИЙ ВЕРХНЕГО ОТДЕЛА ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОГО ТРАКТА

Каткова Анастасия Вениаминовна
кандидат медицинских наук, доцент,
ФГБОУ ВО Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера
sav02.80@mail.ru

INTERACTIVE QUESTIONNAIRE AND DIGITAL CLINICAL DECISION SUPPORT SYSTEM IN PRELIMINARY DIFFERENTIAL DIAGNOSIS OF DISEASES OF THE UPPER GASTROINTESTINAL TRACT

A. Katkova

Summary. The aim of the study is to determine the diagnostic and prognostic significance of individual signs detected by an automated interactive survey system in the preliminary differential diagnosis of diseases of the upper gastrointestinal tract. The analysis of interactive questionnaire data using the gastroenterological module of the automated medical survey system was carried out in 192 patients with verified diseases of the upper gastrointestinal tract: 47 with chronic gastritis and/or duodenitis, 43 with peptic ulcer of the stomach or duodenum, 35 with chronic pancreatitis, 34 with chronic cholecystitis and 33 with with stage I–III gastric cancer. The logistic regression method was used to build predictive models for binary dependent variables. According to the results of an interactive survey, patients with stomach cancer were statistically significantly more likely to experience pain of combined localization and a high prevalence of non-gastroenterological symptoms such as fever and weight loss; and gastric dyspepsia syndrome was significantly more common in non-cancerous diseases of the upper gastrointestinal tract than in stomach cancer. Regression models of diseases of the upper gastrointestinal tract, obtained based on the results of an automated interactive survey system, have demonstrated high diagnostic effectiveness, and can be used for a preliminary differentiated approach to choosing an individual plan for further examination of the patient at the stage of additional laboratory and instrumental studies.

Keywords: interactive survey, digital medical decision support system, preliminary differential diagnostics of digestive system diseases.

Аннотация. Цель исследования — определить диагностическую и прогностическую значимость отдельных признаков, выявляемых с помощью автоматизированной системы интерактивного опроса, в предварительной дифференциальной диагностике заболеваний верхнего отдела желудочно-кишечного тракта. Проведен анализ данных интерактивного анкетирования с помощью гастроэнтерологического модуля автоматизированной системы медицинского опроса 192 больных с верифицированными заболеваниями органов верхнего отдела желудочно-кишечного тракта: 47 — с хроническим гастритом и/или дуоденитом, 43 — с язвенной болезнью желудка или двенадцатиперстной кишки, 35 — с хроническим панкреатитом, 34 — с хроническим холециститом и 33 — с раком желудка I–III стадии. При построении прогностических моделей для бинарных зависимых переменных использовался метод логистической регрессии. По результатам интерактивного опроса у больных с раком желудка статистически значимо чаще наблюдалась боль сочетанных локализаций и высокая распространенность таких негастроэнтерологических симптомов, как повышение температуры тела и снижение массы тела; а синдром желудочной диспепсии достоверно чаще имел место при неопухолевых заболеваниях органов верхнего отдела ЖКТ, чем при раке желудка. Регрессионные модели заболеваний органов верхнего отдела ЖКТ, полученные на основе результатов автоматизированной системы интерактивного опроса, продемонстрировали высокую диагностическую эффективность и могут быть использованы для предварительного дифференцированного подхода к выбору индивидуального плана дальнейшего обследования пациента на этапе выполнения дополнительных лабораторно-инструментальных исследований.

Ключевые слова: интерактивный опрос, цифровая система поддержки принятия врачебных решений, предварительная дифференциальная диагностика заболеваний системы пищеварения.

Введение

Актуальность проведенного исследования определяется не только стабильно высокой распространенностью болезней органов пищеварения: 7,1–7,7 % в структуре общей заболеваемости [1], но и продолжающимся ростом численности взрослого населения, страдающего заболеваниями желудочно-кишечного тракта [2]. Как правило, клиническая картина различных гастроэнтерологических заболеваний во многом характеризуется сходной симптоматологией, и опухолевые заболевания могут маскироваться сим-

птомами хронической патологии неопухолевого происхождения, особенно на ранних стадиях опухолевого процесса [3, 4, 5, 6].

Вопросы цифровизации и модернизации диагностического процесса заболеваний внутренних органов являются приоритетным направлением развития науки и технологий в настоящее время [7, 8, 9].

В настоящее время выполняется все возрастающее число работ по задачам математического моделирования в вопросах диагностики и прогнозирования клинических событий с целью их первичной, вторичной профилактики, повышения эффективности лечения [10, 11] и различные средства электронной медицины: компьютерные программы, системы поддержки принятия врачебных решений — являются неотъемлемой частью современного лечебно-диагностического процесса [12, 13]. Но, несмотря на накопленный опыт исследователей, автоматизированные системы остаются недостаточно внедренными в клиническую практику, в том числе, в вопросах предварительной и дифференциальной диагностики, по причине необходимости клинической валидации и убедительной доказательной базы их эффективности.

Цель исследования — определить диагностическую и прогностическую значимость отдельных признаков, выявляемых с помощью автоматизированной системы интерактивного опроса, в предварительной дифференциальной диагностике заболеваний верхнего отдела желудочно-кишечного тракта.

Материал и методы

В ходе исследования был проведен анализ данных интерактивного анкетирования 192 больных (из них 99 мужчин, 93 женщины; в возрасте 19–80 лет) с верифицированными заболеваниями органов верхнего отдела желудочно-кишечного тракта (ВО ЖКТ): 47 — с хроническим гастритом и/или дуоденитом (ХГД), 43 — с язвенной болезнью (ЯБ) желудка или двенадцатиперстной кишки (ДПК), 35 — с хроническим панкреатитом (ХП), 34 — с хроническим холециститом (ХХ) — на базе терапевтического отделения ГАУЗ ПК «Городская клиническая больница №4» и 33 — с раком желудка (РЖ) I–III стадии — на базе ГБУЗ ПК «Пермский краевой онкологический диспансер». В ряде случаев, для изучения клинической значимости некоторых симптомов и их совокупностей, пациенты с хроническими заболеваниями органов ВО ЖКТ неопухолевого происхождения объединялись в одну группу (n=159), данные интерактивного анкетирования в которой сравнивались с аналогичными результатами в группе больных с раком желудка (n=33).

Изучение принципов эффективности интерактивного опроса и цифровой системы поддержки принятия клинических решений в исследовании осуществлялось на примере интерфейса — структурированного интерактивного опроса с помощью гастроэнтерологического модуля автоматизированной системы «Электронная поликлиника» [14], в которой использован метод проблемной диагностики и калькулятор (счетчик) баллов на основании выявленных симптомов и клинических признаков.

Гастроэнтерологический модуль автоматизированной системы позволял выявить 28 возможных клинических проблем, осуществить балльную оценку каждого симптома заболевания органов ЖКТ. Общее количество вопросов первого этапа обследования гастроэнтерологического модуля составляет 87, с детализацией симптомов — 222.

Статистический анализ результатов исследования проводился с использованием программы Statistica 10.0. При описании качественных данных использовались частоты и доли: в каком проценте (%) случаев те или иные значения качественных признаков встречались в выборке. Сравнение качественных признаков производили с составлением таблиц сопряженности и вычислением непараметрического критерия χ^2 (хи-квадрат). При таблице сопряженности размером 2 х 2 (то есть при 1 степени свободы), применяли поправку Йейтса. При анализе таблиц сопряженности 2 х 2 — при наличии в них абсолютных частот (ожидаемого числа в любой из клеток) меньше 5 — использовался двусторонний вариант точного критерия Фишера [15]. При построении прогностических моделей для бинарных зависимых переменных использовался метод логистической регрессии. Для определения ценности прогностических признаков (моделей) в отношении зависимой переменной определялись их чувствительность (Se) и специфичность (Sp) по стандартной методике, положительная (PVP), негативная прогностическая ценность (NVP) и точность (Ac) [16]. Для непрерывных или интервальных рядов значений признака строились характеристические кривые (ROC-кривые) с расчетом коэффициента — AUROC — площадь под кривой (ППК) и его 95 % доверительного интервала. Прогностическая точность признаков считалась отличной при значениях ППК от 0,9 до 1,0, очень хорошей — от 0,8 до 0,9, хорошей — от 0,7 до 0,8, средней — от 0,6 до 0,7, неудовлетворительной от 0,5 до 0,6. Достоверность различий считалась при $p < 0,05$. принималась альтернативная нулевой статистическая гипотеза.

Результаты и их обсуждение

При изучении эффективности интерактивного опроса в предварительной дифференциальной диагностике заболеваний ВО ЖКТ с помощью гастроэнтерологического модуля удалось обнаружить достоверные различия между группами больных в зависимости от нозологиче-

ской формы заболевания и локализации боли в животе. В тех случаях, когда боль носила распространенный характер, интерактивный вопросник давал возможность определения сочетанных локализаций боли (двух, трех и даже более локализаций одновременно). По результатам анкетирования у больных с раком желудка статистически значимо чаще наблюдалась боль сочетанных локализаций в сравнении как с любой другой группой пациентов, имеющих патологию ЖКТ неопухолевого происхождения в отдельности (χ^2 =10,82, p=0,0010), так и при объединении всех больных с неопухолевыми заболеваниями (χ^2 =42,27, p <0,0001). При этом, более чем половина группы пациентов (55,4 % случаев) с патологией ЖКТ неопухолевого происхождения отмечали у себя боль одной локализации, а у больных с раком желудка статистически значимо чаще отмечались случаи локализации боли более, чем в 1-й области, а также случаи трех и более локализаций одновременно (таблица 1).

Таблица 1.

Частота выявления боли одной и сочетанных локализаций в группах больных с раком желудка и другими неопухолевыми заболеваниями органов ВО ЖКТ (n=192)

Количество локализаций	Неопухолевые заболевания органов ВО ЖКТ (n=159)		Рак желудка (n=33)		χ2	p
	n	%	n	%		
1 локализация	88	55,35	4	12,12	20,46	**<0,0001**
2–3 локализации	48	30,19	17	51,52	5,55	**0,0185**
4–5 локализаций	10	6,29	8	24,24	10,37	**0,0013**

p — статистически значимые различия выделены полужирным шрифтом

Наряду с различиями в распространенности боли сочетанных локализаций, синдром желудочной диспепсии достоверно чаще, в 47,6 % случаев (χ^2=5,24; p=0,0221) имел место при неопухолевых заболеваниях органов ВО ЖКТ, чем при раке желудка (24,3 % случаев). Аналогичные результаты получены в ряде исследований [3, 4].

Интерактивное анкетирование позволило обнаружить статистически значимые различия в высокой распространенности у больных раком желудка, в отличие от других заболеваний неопухолевого происхождения, таких негастроэнтерологических симптомов, как повышение температуры тела (87,9 % случаев) и снижение массы тела (69,7 %). По данным немалого количества научных работ, лихорадка сопутствует опухоли той или иной локализации, на том или ином этапе ее развития [17]. По результатам одного из исследований [4], более, чем у трети пациентов с раком желудка, отмечалось снижение массы тела (от 8 до 20 кг) за период от 2-х-3-х до 6 месяцев на фоне избыточной массы тела у значительной доли больных (53,9 %). Факт избыточной массы тела исходно и после похудания у больных с раком желудка в вышеуказанном исследовании обратил наше внимание и нашел свое подтверждение и в нашем исследовании (по индексу массы тела наших пациентов).

Для решения задач предварительной дифференциальной диагностики нами также был применен метод регрессионного анализа. В качестве переменных были отобраны показатели, имеющие статистическую значимость по результатам интерактивного опроса. На основе отобранных, наиболее часто встречающихся и значимых признаков заболеваний были созданы классификационные регрессионные модели, которые при заданном уровне значимости (p <0,05, χ^2), позволяют осуществлять дифференциальную диагностику описанных выше заболеваний.

Для хронического гастрита и/или дуоденита уравнение логистической регрессии имеет следующий вид:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-(0,2*x_1+0,5*x_2+1,2*x_3+0,6*x_4+0,5*x_5+0,1*x_6-0,2*x_7-1,9)}}$$

где x_1 — боль в подложечной области и правом подреберье, x_2 — боль через 20–30 минут после еды, x_3 — «голодные» боли, x_4 — отрыжка кислым, x_5 — изжога, x_6 — рвота кислым содержимым, x_7 — запоры.

Уравнение логистической регрессии для язвенной болезни:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-\left(\begin{matrix}-18,7*x_1+26,3*x_2+1,1*x_3+2,9*x_4+0,9*x_5+1,5*x_6-3,7*x_7-\\-2,3*x_8+2,5*x_9-2,7\end{matrix}\right)}}$$

где x_1 — боль в подложечной области, x_2 — локальная (точечная) боль, x_3 — боль через 20–30 минут после еды, x_4 — «голодные» боли, x_5 — отрыжка кислым, x_6 — рвота кислым содержимым, x_7 — изжога, x_8 — запоры, x_9 — «овечий» кал.

Ниже представлено уравнение логистической регрессии для хронического панкреатита:

$$y = \frac{1}{1 + e^{\begin{matrix}-(3,2*x_1+7,3*x_2-0,7*x_3-2,0*x_4+4,9*x_5+1,1*x_6+\\+9,7*x_7+0,6*x_8+0,9*x_9-0,6*x_{10}+3,7*x_{11}-5,3*x_{12}-2,7)\end{matrix}}}$$

где x_1 — боль преимущественно в левом подреберье, x_2 — опоясывающие боли, x_3 — отсроченные боли, x_4 — нарушение аппетита, x_5 — рвота съеденной пищей, x_6 — диарея, x_7 — кашицеобразный стул, x_8 — метеоризм, x_9 — урчание в животе, x_{10} — повышение температуры тела, x_{11} — потливость, x_{12} — снижение массы тела.

Для хронического холецистита уравнение логистической регрессии имеет следующий вид:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-(4,3*x_1+0,9*x_2+2,8*x_3+2,6*x_4-0,04*x_5-1,1*x_6+0,5*x_7-4,9)}}$$

где x_1 — боль в правом подреберье, x_2 — боль отсроченная (через 2–3 часа после приёма пищи), x_3 — отрыжка горьким, x_4 — рвота с желчью, x_5 — урчание в животе, x_6 — метеоризм, x_7 — повышение температуры тела.

Ниже представлено уравнение логистической регрессии для рака желудка:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-(2,6*x_1+1,6*x_2+2,4*x_3+2,2*x_4)}}$$

где x_1 — сочетанная локализация боли, x_2 — боль преимущественно сразу после еды, x_3 — повышение температуры тела, x_4 — снижение массы тела.

В таблице 2 представлена эффективность регрессионных моделей для дифференциальной диагностики заболеваний органов ВО ЖКТ.

Таблица 2.

Операционные характеристики регрессионных моделей для дифференциальной диагностики заболеваний ВО ЖКТ

Характеристика	ХГД	ЯБ	ХП	ХХ	РЖ
Se, %	8,5 (3,0; 14,0)	90,2 (79,5; 96,3)	82,9 (70,9; 88,9)	76,5 (62,9; 85,5)	63,6 (50,2; 71,5)
Sp, %	97,2 (95,5; 99,0)	96,0% (93,1; 97,7)	98,1 (95,4; 99,4)	96,2 (93,3; 98,1)	97,5 (94,7; 99,1)
PVP, %	50,0 (17,7; 82,3)	86,0 (75,8; 91,8)	90,6 (77,6; 97,3)	81,3 % (66,8; 90,8)	84,0 (66,2; 94,4)
NVP, %	76,6 (75,2; 78,0)	97,3 (94,4; 99,0)	96,3 (93,6; 97,6)	95,0 (92,1; 96,9)	92,8 (90,1; 94,4)
Ac, %	75,5 (72,8; 78,2)	94,8 (90,2; 97,4)	95,3 (91,0; 97,5)	92,7 (87,9; 95,9)	91,7 (87,0; 94,4)
AUROC	0,6 (0,5; 0,7) p = 0,041	0,90 (0,85; 0,98) p <0,001	0,94 (0,89; 0,98) p <0,001	0,74 (0,63; 0,85) p <0,001	0,81 (0,70; 0,91) p <0,001

Как видно из таблицы, полученные регрессионные модели демонстрируют высокую точность дифференциальной диагностики рассматриваемых заболеваний: общая точность для моделей превышает 75 %. Что касается диагностической чувствительности, т.е. способности тест-системы верно определять фактическое наличие болезни, то следует отметить достаточно низкий и неинформативный (менее 50 %) показатель для модели, направленной на диагностику хронического гастрита и/или дуоденита. Это может быть связано с большим числом неспецифических клинических проявлений, характерных для данного заболевания, таких как диспепсические симптомы или нейровегетативные реакции, которые могут маскировать данное заболевание под другие заболевания ЖКТ, тем самым уменьшая качество специфической диагностики. Однако созданная модель зарекомендовала себя как высокоточный метод скрининга (специфичность = 97,2 %) для хронического гастрита и/или дуоденита, что позволяет использовать её в рамках профилактических мероприятий и при составлении вопросников, использующихся на периодических профилактических осмотрах в медицинских организациях амбулаторно-поликлинического типа.

Чувствительность других моделей в среднем высокая, что свидетельствует о высокой точности диагностики язвенной болезни, хронического холецистита и панкреатита, а также опухолевого заболевания желудка (средняя чувствительность моделей, описывающих указанные заболевания, равна 78,3 % при минимальном значении 63,6 % для рака желудка и 90,2 % для язвенной болезни). Способность верно определять здоровых лиц при фактическом отсутствии у них болезни, т.е. значение диагностической специфичности, в среднем превышает 95,0 %, что позволяет рассматривать полученные регрессионные модели как самостоятельные классификационные инструменты, которые при рутинном использовании в клинической практике могут позволить значимо повысить качество скрининговых мероприятий рассматриваемых заболеваний верхних отделов ЖКТ.

Среднее значение AUROC для хронического панкреатита, холецистита, язвенной болезни и рака желудка, превышающее 0,85, свидетельствует о значимом потенциале полученных тест-систем как классификаторов для предварительной дифференциальной диагностики упомянутых заболеваний. Что касается определения наличия хронического гастрита и/или дуоденита, то, как уже было упомянуто выше, наличие неспецифических симптомов данного заболевания ощутимо снижает качество дифференциальной диагностики, не исключая гастрит из списка возможных патологий у пациента. Рассчитанная регрессионная модель значима (p>0,05) и информативна для клинического применения, однако AUROC, равная 0,6, не позволяет рекомендовать её как элемент автоматизированной диагностической системы. В противовес этой системе, модели, описывающие другие рассматриваемые патологии: хронические панкреатит и холецистит, язвенную болезнь и рак желудка, могут быть рассмотрены как самостоятельные элементы потенциальных систем поддержки принятия врачебных решений.

Таким образом, средняя чувствительность моделей составила 78,3 %, средняя общая точность превысила 75 %, специфичность — 95 %, а также, среднее значение AUROC превысило для большинства моделей: при хро-

ническом панкреатите, холецистите, язвенной болезни и раке желудка — 0,85.

Выводы

Регрессионные модели заболеваний органов верхнего отдела ЖКТ, полученные на основе результатов автоматизированной системы интерактивного опроса, продемонстрировали высокую диагностическую эффективность и могут быть использованы для предварительного дифференцированного подхода к выбору индивидуального плана дальнейшего обследования пациента на этапе выполнения дополнительных лабораторно-инструментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болкисева П.С., Фазылзянова А.Р., Ямщикова Т.В., Гурьянова Н.Е. Выявление факторов риска возникновения заболеваний органов пищеварения. Modern Science. 2020. № 12–2. С. 48–50. https://elibrary.ru/download/elibrary_44379121_52906777.pdf
2. Суслин С.А., Трибунская С.А., Колсанова О.А., Алехин И.А., Виргильев П.С. Болезни органов пищеварения как проблема общественного здоровья в современных условиях. Международный научно-исследовательский журнал. 2025. №12 (162). https://elibrary.ru/download/elibrary_87614990_43219582.pdf
3. Трухан Д.И., Тарасова Л.В., Диомидова В.Н., [и др.]. Болезни органов пищеварения. Диагностика и принципы лечения: учебное пособие. ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Чебоксары, 2024. 342 с.
4. Наумова Л.А., Осипова О.Н. Ведущие симптомы и особенности коморбидного фона при раке желудка. Вестник СурГУ. Медицина. 2014; (1): 31–34. https://cyberleninka.ru/article/n/veduschie-simptomy-i-osobennosti-komorbidnogo-fona-pri-rake-zheludka/viewer
5. Айталиев М.С., Земляной В.П., Непомнящая С.Л., [и др.]. Особенности клинических проявлений рака проксимального отдела желудка с инфильтрацией кардии и пищевода. Сибирское медицинское обозрение. 2004; (4): 24–26. https://elibrary.ru/item.asp?id=12567860
6. Шульпекова Ю.О., Русяев В.Ю., Шептулин Д.А., [и др.]. Сочетание функциональных заболеваний органов пищеварения. Медицинский совет. 2020; (5): 96–102. https://doi.org/10.21518/2079-701X-2020-5-96-102
7. Козенко Ю.А., Козенко Т.Е. Роль искусственного интеллекта в построении цифровой медицины. Сибирская финансовая школа. 2020; 1 (137): 83–86. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42873388.
8. Минаева Ю.В., Романова И.В., Кириллова Т.С. Компьютерные технологии в практической медицине. Альманах мировой науки. 2020; 4 (40): 8–10. https://elibrary.ru/item.asp?id=44247671.
9. Мишланов В.Ю., Зуев А.Л., Фазрахманов Р.А. Биоэтика как основа развития систем искусственного интеллекта в медицине. В сборнике: Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века. Сборник статей по материалам Четвертой всероссийской научно-практической конференции, проводимой в рамках Пермского естественнонаучного форума «Математика и глобальные вызовы XXI века». 2019: 223–227. https://permai.ru/files/sbornik_trudov_2019_1.pdf
10. Богдановский М.А. Использование методов математического моделирования в медицине. В сборнике: Старт в науке 2024. Сборник статей VII международного научно-исследовательского конкурса. Пенза, 2024: 7–11.
11. Шутова С.В. Гойдин А.П., Савилов П.Н. Применение математического моделирования и прогнозирования в физиологии и медицине. Биология и интегративная медицина. 2024; 3 (68): 417–426. https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-matematicheskogo-modelirovaniya-v-fiziologii-i-meditsine/viewer
12. Наумович С.А., Наумович С.С. Системы поддержки принятия врачебных решений. Современная стоматология. 2023; (2): 2-7. https://cyberleninka.ru/article/n/sistemy-podderzhki-prinyatiya-vrachebnyh-resheniy-1/viewer
13. Березин Д.Д. Исследование проектирования современных систем помощи принятия врачебных решений, их история развития в России и мире. Актуальные исследования. 2023; 3 (184): 73–77. https://elibrary.ru/item.asp?id=59744108
14. Мишланов Я.В., Мишланов В.Ю., Мишланова И.В., Мишланова С.Л. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Электронная поликлиника» №2012614202; опубл. 12.05.12.
15. Тишков А.В., Хромов-Борисов Н.Н., Комашня А.В., [и др.]. Статистический анализ таблиц 2×2 в диагностических исследованиях. СПб.: Издательство СПбГМУ, 2013. 20 с. https://studfile.net/preview/11603589/
16. Кочетов А.Г., Лянг О.В., Масенко В.П., [и др.]. Методы статистической обработки медицинских данных: Методические рекомендации для ординаторов и аспирантов медицинских учебных заведений, научных работников. М.: РКНПК, 2012. 42 с. https://www.fedlab.ru/upload/medialibrary/e05/_.pdf
17. Лалим О.А., Однокозова Ю.С. Субфебриллитет, как паранеопластическая реакция. Бюллетень медицинских интернет-конференций. 2014; 4(5): 514. https://cyberleninka.ru/article/n/subfebrilitet-kak-paraneoplasticheskaya-reaktsiya/viewer

© Каткова Анастасия Вениаминовна (sav02.80@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.15

БЕРЕМЕННОСТЬ И РАК ШЕЙКИ МАТКИ — ДВА КЛИНИЧЕСКИХ СЛУЧАЯ И ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

PREGNANCY AND CERVICAL CANCER — A CLINICAL CASE REPORT AND REVIEW OF THE LITERATURE

M. Konovalova
S. Gaidukov
L. Kurdynko
T. Prokhorovich
Sh. Dzhanibekova

Summary. This paper presents a clinical case of successful treatment of invasive cervical cancer in a patient with pregnancy preservation. At the first stage of diagnosis, after verification of the malignancy, a follow-up examination was performed to determine the involvement of regional lymph nodes. At about 14 weeks of pregnancy, the patient underwent laparoscopic lymphadenectomy with subsequent histologic examination of the lymph nodes. The lymph nodes were found to be intact, therefore a decision was made to prolong the pregnancy up to 32 weeks with planned delivery by cesarean section and hysterectomy. Adjuvant therapy was performed — 2 courses of alkylating cytostatics starting from the 19th week of pregnancy and radiation therapy in the postpartum period. Pregnancy and delivery proceeded without fetal complications, the patient is in stable remission, now freedom from recurrence is 49 months.

Keywords: pregnancy, cervical cancer.

Коновалова Марина Владиславовна
кандидат медицинских наук, доцент,
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский Государственный Педиатрический Медицинский Университет
marinavladyslavovna@mail.ru
Гайдуков Сергей Николаевич
доктор медицинских наук, профессор,
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский Государственный Педиатрический Медицинский Университет
gaiducovsn@yandex.ru
Курдынко Людмила Витальевна
кандидат медицинских наук, ассистент,
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский Государственный Педиатрический Медицинский Университет
l.kurdynko@yandex.ru
Прохорович Татьяна Ивановна
кандидат медицинских наук, доцент,
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский Государственный Педиатрический Медицинский Университет
tatyana.prohorovich@yandex.ru
Джанибекова Шерифат Салиховна
кандидат медицинских наук, ассистент,
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский Государственный Педиатрический Медицинский Университет
sdzhanibekova@yandex.ru

Аннотация. В данной работе представлен клинический случай успешного лечения инвазивного рака шейки матки у пациентки с сохранением беременности. На первом этапе диагностики, после верификации злокачественного образования было проведено дообследование с целью определения поражения регионарных лимфоузлов. Примерно на 14 неделе беременности пациентке была проведена лапароскопическая лимфаденэктомия с последующим гистологическим исследованием лимфоузлов. Лимфоузлы оказались интактны, в связи с чем было принято решение о пролонгировании беременности до 32 недели с плановым родоразрешением путем кесарева сечения и выполнением гистерэктомии. Проводилась адъювантная терапия — 2 курса цитостатика алкилирующего действия, начиная с 19 недели беременности и лучевая терапия в послеродовом периоде. Беременность и роды протекали без осложнений со стороны плода, пациентка находится в стойкой ремиссии, на данный момент свобода от рецидива составляет 49 месяцев.

Ключевые слова: беременность, рак шейки матки.

Несмотря на то, что среди беременных рак шейки матки встречается достаточно редко, по некоторым данным частота выявления инвазивного рака шейки матки составляет 1 случай на 2 000–10 000 беременных [1]. Рак шейки матки занимает первое место среди новообразований репродуктивных органов, которые выявляются во время гестации [2]. Чаще всего встречается плоскоклеточный рак — 75 %, на втором месте — низкодифференцированный рак и на третьем месте — железистый [3]. Следует отметить, что данная

проблема является достаточно важной, так как до сих пор нет достаточно четкого представления об оптимальной тактике ведения с точки зрения сохранения беременности (особенно при диагностированном раке до 20 недели гестации) и наилучшего прогноза выживаемости. Большинство работ, опубликованных по данной теме, обладают достаточно низким уровнем доказательности в силу отсутствия систематизированных отдаленных результатов общей и без рецидивной выживаемости в данной когорте пациентов [4].

Представленные клинические случаи обращают внимание на данную проблему и способствует продолжению накоплению клинического опыта [5].

Цель исследования заключается представить клинические случаи успешного ведения пациентки с раком шейки матки и сохранением беременности.

Материалы и методы

Настоящее клиническое исследование посвящено анализу ведения и успешного родоразрешения женщин с раком шейки матки. В рамках научной работы была проанализирована медицинская документация двух клинических случаев: выписные эпикризы, данные клинико-лабораторных исследований, инструментальных исследований, заключения врачей-специалистов.

Клиническое наблюдение 1

Пациентка П., 41 года, повторнобеременная, повторнородящая, поступила в Перинатальный центр СПбГПМУ с диагнозом: Беременность 35 недель 3 дня. Угрожающие преждевременные роды. Рак шейки матки 1В N1B1N0M0 G2. ОАГА. Латентный дефицит железа. Вегетососудистая дистония по кардиальному типу. Высокий паритет родов. Общий анамнез: ОРВИ. НЦД по кардиальному типу. Детские инфекции — ветряная оспа. Вредные привычки у матери — отрицает. Наследственность не отягощена. При изучении акушерско-гинекологического анамнеза установлено, что менструации с 16 лет, по 6 дней, через 28 дней, регулярные, умеренные, безболезненные. Дата последней менструации 25.05.2024. Начало половой жизни с 16 лет. Брак не зарегистрирован. Контрацепция не использует. Гинекологические заболевания: эктопия шейки матки, по поводу которой с 2002 г. находилась на диспансерном наблюдении. Рак шейки матки 1В N1 B1 N0 M0 G2 был диагностирован во время беременности. При МРТ органов малого таза обнаружено образование (Са?) шейки матки (в области задней губы). Настоящая беременность 11. Шесть беременностей закончились срочными родами через естественные родовые пути. Последние роды в 2019 г. родилась живая доношенная девочка массой 3800 г, послеродовый период без осложнений. Четыре беременности в 2015–2018 гг. завершились искусственным абортом на ранних сроках без осложнений. На учете по поводу настоящей беременности в ЖК с 21/22 недели. Общая прибавка веса 5 кг, за 20 недель, равномерная. 23.08.2024 г. по результатам онкоцитологии: цитограмма с патологией плоского эпителия L-SIL (HPV). Госпитализация в сроке беременности 18 недель. Объемное образование шейки матки. Выполнена биопсия шейки матки. При патологоанатомическом исследовании биопсионного материала установлен умеренно дифференцированный инвазивный плоскоклеточный рак. МРТ малого таза: цервикальный канал умеренно расширен. В области задней губы шейки матки просматривается гипоинтенсивный участок размером 17х17х19 мм, с ограничением диффузии. Заключение: по данным МР томографии: Образование (Са?) шейки матки (в области задней губы).

Находилась в отделении патологии беременности Перинатального центра СПбГПМУ со срока беременности 33 недели 4 дня. Рак шейки матки 1В N1B1N0M0 G2. ОАГА. Латентный дефицит железа. Вегетососудистая дистония по кардиальному типу. Высокий паритет родов (Б-11 Р-7). При осмотре в зеркалах: слизистая влагалища чистая, нормальной окраски. Влагалищной части шейки матки эрозирована, по задней губе шейки матки + ткань 1,5х1 см. Выделения слизистые, скудные, без запаха. Вагинально не осмотрена. По результатам обследования: снижение уровня ферритина до 15,6 мкг/л, при доплерометрии выявлены нарушения маточно-плацентарного кровотока при сохранении плодово-плацентарного (I А степени) с последующей нормализацией показателей. На консилиуме с участием онкогинеколога, показаний для досрочного родоразрешения не выявлено. Решено было пролонгировать беременность до доношенного срока (37/38 недель) путем операции кесарева сечения с расширением объема до операции Вертгейма с участием мультидисциплинарной бригады. В сроке беременности 36 недель 5 дней в связи с развитием родовой деятельностью была родоразрешена оперативным путем в экстренном порядке. За головку на 2 мин. извлечен живой, мальчик массой тела 3480 г, длина 50 см, оценка по Апгар 7/8 баллов, без видимых пороков развития. При участии онкогинеколога была выполнена радикальная нервосберегающая экстирация матки с придатками, параметриями и верхней третью влагалища, двусторонняя тазовая лимфаденэктомия (Piver III тип, Querleu–Morrow тип С1). Общая кровопотеря составила 1200 мл. Заключительный диагноз: Роды VII преждевременные в 36 недель 5 дней. Рак шейки матки 1В N1B1N0M0 G2. ОАГА. Лабильная артериальная гипертензия. Соматоформная вегетативная дисфункция. Панические атаки в анамнезе. Варикозная болезнь вен нижних конечностей. Латентный дефицит железа. Высокий паритет родов (Б -11 Р-7). Срединная лапаротомия. Кесарево сечение в нижнем сегменте матки. Радикальная нервосберегающая экстирпация матки с придатками, па-

раметриями и верхней третью влагалища, двусторонняя тазовая лимфаденэктомия (Piver III тип, Querleu–Morrow тип C1). При патологоанатомическом исследовании биопсийного (операционного) материала установлен — умеренно дифференцированный плоскоклеточный рак шейки матки с инвазией 11 мм в строму (толщина стенки шейки в месте инвазии 45 мм), ВПЧ-ассоциированная, с переходом на заднюю стенку влагалища (pt1b1n0, iв1). Тазовые лимфоузлы справа и слева без опухолевых клеток. Тело матки и трубы без опухолевых клеток.

В послеоперационном периоде наблюдалась и получала лечение в ОАРИТ в течение 3 суток, затем переведена в акушерское физиологическое отделение, где находилась вместе с ребенком и получала антибактериальную терапию, профилактику тромбоэмболических осложнений, антианемическую терапию парентеральными препаратами железа, учитывая снижение уровня гемоглобина до 96 г/л. Выписана на 12 сутки послеродового периода с ребенком в удовлетворительном состоянии с лабораторными показателями в пределах референсных значений под наблюдение женской консультации с рекомендациями продолжить низкомолекулярные гепарины в течение 6 недель после родов (высокий риск ВТЭО).

Клиническое наблюдение 2

Пациентка Б., 32 лет, повторно беременная, повторнородящая, поступила по направлению женской консультации с диагнозом: Беременность 34 недель 6 дней. Рак шейки матки IB1 cT1b1NxMoG3. Лапароскопия, двусторонняя подвздошно-тазовая лимфаденэктомия от 08.18 г. Состояние после 3-го цикла 1-й линии химиотерапии по схеме «TCb» от 19.09.18 г. Аллопеция I ст. ОСА. Рассеянный энцефаломиелит, периферический увеит в анамнезе. ПХРД сетчатки обоих глаз. Разрыв сетчатки на фоне ПХРД в анамнезе (БЛК 2017г). Перенесенные заболевания: ветряная оспа, краснуха, ОРВИ. Последствия перенесенной нейроинфекции (рассеянный энцефаломиелит в 2016 г.), в виде тетрапирамидного синдрома. Периферический увеит в 2014–2017 гг. ПХРД сетчатки, ангиопатия сетчатки обоих глаз, разрыв сетчатки на фоне ПХРД, отграниченное БЛК левого глаза в 2017 г. Лазерная коагуляция сетчатки левого глаза в 2017 г. Наследственность не отягощена. Акушерско-гинекологический анамнез. Менструации с 16 лет по 5 дней через 28 дней, регулярные, умеренные, безболезненные. Последняя менструация 04.05.18 г. Половая жизнь с 18 лет в браке. Гинекологические заболевания: Дисплазия шейки матки тяжелой степени — CIN III с 2017 г.; от 30.05.18 г. Рак шейки матки IB1 cT1b1NxMoG3. Лапароскопия. Двусторонняя подвздошно-тазовая лимфаденэктомия от 14.08.18 г., проведено 3 цикла химиотерапии.

Настоящая беременность 3. 1 беременность завершилась в 2009 г. преждевременными родами на 32 неделе беременности живым недоношенным мальчиком массой 2370 гр., послеродовый период без осложнений. 2 в 2013 г. — роды срочные физиологические в 40 недель беременности, живой доношенной девочкой массой 3560 гр, послеродовый период без осложнений. По поводу настоящей беременности наблюдается в женской консультации с 16 недель беременности. У пациентки было три госпитализации: первая госпитализация в 15/16 недель беременности. Рак шейки матки IB1 cT1b1NxMoG3. Лапароскопия. Двусторонняя тазовая лимфаденэктомия от 14.08.18 г. В последующем проведены три курса химиотерапии: в 20 недель беременности проведен 1 курс химиотерапии по схеме TCb (AUC5) — таксакад 175 мг/м^2 — 260 мг в/в, карбоплактин AUC 5 — 650 мг в/в кап, Д-1); в 25 недель — 2 цикла химиотерапии (карбоплатин 730 мг, паклитаксел 175 мг/м^2 270 мг, дексаметазон, фраксипарин) и в 31 неделю беременности — 3 цикл химиотерапии (карбоплатин 770 мг, паклитаксел 175 мг/м^2 270 мг).

В Перинатальном центре СПБГПМУ во время гинекологического осмотра со стороны шейки матки установлено: наружный зев приоткрыт, визуализируется изъязвленные участки ткани, слегка кровоточащие при взятии мазка ватным тампоном, на передней и левой боковой частях гипертрофированная ткань. Выделения светлые, слизистого характера. При влагалищном исследовании: влагалище рожавшей. Шейка матки слегка отклонена к крестцу, неравномерной длины 1.5–2 см с плотными участками по передней и левой боковой частях. Наружный зев пропускает кончик пальца. При обследовании установлено снижение уровня гемоглобина до 106 г/л. По данным УЗИ (фетометрия и доплерометрия): беременность 34 6/7 недель, без гемодинамических нарушений. После проведенного консилиума с участием онкогинеколога, учитывая наличие у беременной рака шейки матки IB1 cT1b1NxMoG3 (плоскоклеточный неорговевающий рак шейки матки G 2–3 на фоне карциномы in situ), показано оперативное родоразрешение совместно с онкологами. Планируется операция кесарево сечение в нижнем сегменте матки с расширением объема операции: расширенная пангистерэктомия — операция Вертгейма–Мейгса 14.01.2019. в 14 час 02 мин, мальчик, живой, недоношенный, вес 2600 г, рост 47 см, с оценкой по шкале Апгар 7/8 баллов. Общая кровопотеря 600 мл. Заключительный диагноз: Роды 3 преждевременные в 36/37 недель. Рак шейки матки IB cN1b1NxMoG3. Состояние после лапароскопии, подвздошно-тазовой лимфаденэктомии в 2018 г. Состояние после 3-х курсов химиотерапии по схеме «TCb» от 19.09.18. ОСА. Рассеянный энцефаломиелит, периферический уевит в анамнезе. ПХРД сетчатки обоих глаз. Разрывы сетчатки на фоне ПХРД (БЛК в 2017 году). Нижнесрединная лапаротомия. Кесарево сечение в нижнем сегменте матки. Временная баллонная окклюзия брюшного отдела аорты. Расширенная гистерэктомия по Вертгейму. Находилась на ле-

чении в ОАРИТ в течение 3 дней. Затем переведена в акушерское физиологическое отделение, где находилась совместно с ребенком. Проводилась антибактериальная терапия, профилактика венозных тромбоэмболических осложнений. Выписана на 10 сутки с ребенком в удовлетворительном состоянии с лабораторными показателями в пределах референсных значений под наблюдение женской консультации.

Тактика лечения определяется в зависимости от стадии заболевания и срока беременности. На сегодняшний день рекомендации по ведению беременных пациенток с диагностированным раком шейки матки, следующие: при начальных стадиях, а именно, при IA2, IB, II стадии показано радикальное лечение [5–6]. Пациенткам, не желающим сохранять беременность, выполняют прерывание беременности и проводят лечение в соответствии со стандартами лечения рака шейки матки [7]. В первом триметре беременности это радикальная гистерэктомия, дополненная широкой лимфодиссекцией и адъювантной лучевой терапией и без сохранения беременности. Во втором и третьем триместрах возможно пролонгирование беременности до 32–35 недели (в ряде случаев показано досрочное родоразрешение) с последующим кесаревым сечением, гистерэктомией, лимфодиссекцией и адъювантной химиолучевой терапией [8]. Плановая отсрочка лечения возможна у тех женщин, у которых на момент постановки диагноза I стадии срок гестации ≥20 недель и которые хотят сохранить беременность. При этом возможно проведение радикальной гистерэктомии вместе с лимфотическими узлами на 34–36 неделе беременности [9]. При этом следует отметить тот факт, что выживаемость несколько выше при раке шейки матки во время беременности. Это обусловлено тем, что у большинства женщин на момент обращения имела место I стадия заболевания [10].

При распространенных формах рака шейки матки, как правило, сохранение беременности невозможно. Вместе с этим, все больше возможностей возникает для сохранения как беременности, так и фертильности при лечении инвазивного рака шейки матки.

По данным нескольких метаанализов было показано, что объем поражения регионарных лимфоузлов является наиболее значимым фактором, влияющим на тактику лечения и исход онкологического заболевания. У пациентов с интактными регионарными лимфоузлами свобода от рецидива равна 100 % при наблюдении в течение 65,5 месяцев (исследование проведено на 47 пациентов с раком T1bN0M0), в свою очередь, у пациенток с раком T1bNxMx частота рецидивов составила примерно 5 % при наблюдении в течение 37,5 месяцев (n=76) [11].

Изучение сигнальных лимфоузлов является прогностически значимым при подборе оптимальной терапии. По статистике при раннем раке шейки матки поражение регионарных лимфоузлов встречается примерно в 30 % случаев. С целью определен статуса лимфатичских узлов принято использовать метод флуоресцентной детекции индоцианином [12]. Данный метод является достаточно чувствительным и специфичным. Позволяет более прецизионно отбирать пациентов на операцию Вертгейма, снизить частоту рецидивов. В связи с этим, в настоящее время в онкогинекологии присутствует принцип ультрастадирования опухоли по уровню поражения сигнальных лимфоузлов.

Показано, что при отсутствии метастатически поражённых лимфоузлов пролонгирование беременности не влияет значимо на исход онкологического заболевания, но тогда в большинстве случаев показана адъювантная химиотерапия цитостатиками, начиная с 20 недели беременности, и лучевая терапия в послеродовом периоде. Если же найдены метастатически измененные лимфоузлы, в настоящее время показано прерывание беременности [13].

Данная тактика обусловлена достаточно низкой выживаемостью пациенток в течение 5 лет. Если имеются поражения лимфоузлов, она составляет менее 30 %, в свою очередь, при интактных лимфоузлах 5-летняя общая выживаемость выше 75 %, если пациентке выполнена операция Вертгейма, дополненная неадъювантной терапией [14].

Безусловно, беременность усложняет терапию рака шейки матки. Так было показано, что при стадии N0 5-летняя выживаемость беременных пациенток была 81,2 % против 88,2 % в группе контроля (p-value <0,05). В стадии N1 имелись еще большие различия — 5-летняя выживаемость пациенток с беременностью и раком шейки матки составила 38,5 % против 47,8 % в группе контроля. Таким образом, несмотря на общую тенденцию в онкогинекологии к сохранению фертильности и беременности пациенток, требуется очень тщательная оценка прогноза с использованием надежных методов исследования сигнальных лимфоузлов [15].

Европейские специалисты также акцентируют на этом внимание, предлагая свой алгоритм ведения пациенток. Если размер опухоли шейки матки менее 2 сантиметров, то в большинстве случаев выполняется лимфаденэктомия с последующим исследованием лимфатических узлов. В случаях, если они содержат «плюс-ткань», показано прерывание беременности с последующим стандартным лечением в отделении онкогинекологии [16].

Если же лимфоузлы остались непоражёнными, имеется 2 варианта дальнейшего лечения — пролонгирование беременности с последующим родоразрешением

и одномоментной гистерэктомией, альтернативой данному варианту является проведение органосохраняющего вмешательства в объеме трахелэктомии, однако, результаты данного вмешательства пока не обладают высокой доказанной эффективностью [17].

Оценка состояния лимфоузлов в настоящее время проводится с применением лапароскопических методик. Данный вид вмешательства, как показали рандомизированные исследования, не проигрывает по диагностической мощности открытому вмешательству, но, вместе с этим, значимо снижает периоперационные риски. Вместе с этим, стоит отметить, что лапароскопическая лимфаденэктомия ассоциируется с повышенным риском при проведении ее позднее 20 недели беременности, а по некоторым данным, ее проведение позднее 16 недели беременности считается нецелесообразным [18]. Следует учитывать, что большой размер матки и выраженная коллатеральная васкуляризация могут технически усложняют вмешательство.

По итогам проведенного исследования целесообразно сделать следующие выводы:

1. При инвазивном раке шейки матки и беременности до 16 недели показано радикальное лечение, объем которого определяется после проведения тазовой лимфаденэктомии и ультрастадирования рака.
2. При интактных тазовых лимфатических узлах показано сохранение беременности и ее пролонгирование до 32–34 недели, в ряде случаев и более поздних сроков с последующим проведением кесарева сечения, дополненного гистерэктомией.
3. Адъювантная химиолучевая терапия показана для улучшения прогноза безрецидивной выживаемости, достижения стойкой ремиссии. Альтернативные вмешательства, как например органосохраняющая трахелэктомия не показала обнадеживающих результатов.
4. Для диагностики поражения регионарных лимфоузлов необходимо использовать современные технологии, в том числе, детекцию лимфатических узлов с помощью индоцианина зелёного, тщательное изучение всех резецированных лимфоузлов в нескольких срезах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Perkins R.B., Guido R.S., Castle P.E., et al. 2019 ASCCP Risk-Based Management Consensus Guidelines for Abnormal Cervical Cancer Screening Tests and Cancer Precursors [published correction appears in J Low Genit Tract Dis. 2020 Oct;24(4):427. doi: 10.1097/LGT.0000000000000563]. J Low Genit Tract Dis. 2020;24(2):102–131. doi:10.1097/LGT.0000000000000525.
2. Акушерство: учебник /А.А. Безменко, Д.И. Гайворонских, И.В. Гайворонских и др. — СПб.: СпецЛит, 2024. 487 с.
3. Cibula D., Raspollini M.R., Planchamp F., et al. ESGO/ESTRO/ESP Guidelines for the management of patients with cervical cancer — Update 2023. Int J Gynecol Cancer. 2023;33(5):649–666. Published 2023 May 1. doi:10.1136/ijgc-2023-004429.
4. Bowden S.J., Doulgeraki T., Bouras E., et al. Risk factors for human papillomavirus infection, cervical intraepithelial neoplasia, and cervical cancer: an umbrella review and follow-up Mendelian randomisation studies. BMC Med. 2023;21(1):274. Published 2023 Jul 27. doi:10.1186/s12916-023-02965-w.
5. Beharee N., Shi Z., Wu D., Wang J. Diagnosis, and treatment of cervical cancer in pregnant women. Cancer Med. 2019;8(12):5425–5430. doi:10.1002/cam4.2435.
6. Arbyn M., Xu L., Simoens C., Martin-Hirsch P.P. Prophylactic vaccination against human papillomaviruses to prevent cervical cancer and its precursors. Cochrane Database Syst Rev. 2018;5(5):CD009069. Published 2018 May 9. doi: 10.1002/14651858.CD009069.pub3.
7. Хохлова С.В., Кравец О.А., Морхов К.Ю., Нечушкина В.М., Саевец В.В., Тюляндина А.С. и соавт. Практические рекомендации по лекарственному лечению рака шейки матки. Практические рекомендации RUSSCO, часть 1. Злокачественные опухоли, 2023 (том 13), #3s2, стр. 246–262.
8. Amabebe E., Ogidi H., Anumba D.O. Matrix metalloproteinase-induced cervical extracellular matrix remodelling in pregnancy and cervical cancer. Reprod Fertil. 2022;3(3): R177-R191. Published 2022 Aug 9. doi:10.1530/RAF-22-0015.
9. Акушерство: учебник /А.Н. Стрижаков, И.В. Игнатко, А.И. Давыдов — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2020. — 1072 с.
10. Гинекология по Уильямсу/ под ред. Б.Л. Хоффман, Дж.Ш. Шорджа, Л.М. Хальварсон и др.; пер. с англ. под ред. Г.Т. Сухих, В.Н. Серова. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2023. — 1280 с.
11. Hammer A., Haubjerg L., Gibrael H.S., et al. Ugeskr Laeger. 2022;184(35): V03220187.
12. Perkins R.B., Guido R.L., Saraiya M., et al. Summary of Current Guidelines for Cervical Cancer Screening and Management of Abnormal Test Results: 2016–2020. J Womens Health (Larchmt). 2021;30(1):5–13. doi:10.1089/jwh.2020.8918.
13. Lycke K.D., Kahlert J., Petersen L.K., et al. Untreated cervical intraepithelial neoplasia grade 2 and subsequent risk of cervical cancer: population-based cohort study. BMJ. 2023;383: e075925. Published 2023 Nov 29. doi:10.1136/bmj-2023-075925.
14. Ruan X. Chinese Expert Consensus on ovarian function and fertility preservation of cervical cancer in pregnancy (2023). Front Endocrinol (Lausanne). 2023; 14:1280631. Published 2023 Dec 13. doi:10.3389/fendo.2023.1280631.
15. Cintra G.F., Derchain S.F.M., Bicalho D.S., Filho A.L.D.S., Primo W.Q.S.P. Cervical cancer in pregnancy. Rev Bras Ginecol Obstet. 2023;45(5):293–296. doi:10.1055/s-0043–1770142.
16. da Silva R.L.M., da Silva T.T.M., Pessoa R.L., et al. Use of ginger to control nausea and vomiting caused by chemotherapy in patients with cervical cancer undergoing treatment: An experiment. Medicine (Baltimore). 2022;101(24): e29403. Published 2022 Jun 17. doi:10.1097/MD.0000000000029403.
17. Bentivegna E., Maulard A., Pautier P., Chargari C., Gouy S., Morice P. Fertility results and pregnancy outcomes after conservative treatment of cervical cancer: a systematic review of the literature. Fertil Steril. 2016;106(5):1195–1211.e5. doi: 10.1016/j.fertnstert.2016.06.032.
18. Wipperman J., Neil T., Williams T. Cervical Cancer: Evaluation and Management. Am Fam Physician. 2018;97(7):449–454.

© Коновалова Марина Владиславовна (marinavladyslavovna@mail.ru); Гайдуков Сергей Николаевич (gaiducovsn@yandex.ru);
Курдынко Людмила Витальевна (l.kurdynko@yandex.ru); Прохорович Татьяна Ивановна (tatyana.prohorovich@yandex.ru);
Джанибекова Шерифат Салиховна (sdzhanibekova@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.20

КЛИНИКО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МРРШМ КАК ФАКТОРЫ ПРОГНОЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ХИМИОЭМБОЛИЗАЦИИ МАТОЧНЫХ АРТЕРИЙ

CLINICAL AND MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF LOCALLY ADVANCED CERVICAL CANCER AS PREDICTORS OF THE EFFECTIVENESS OF UTERINE ARTERY CHEMOEMBOLIZATION

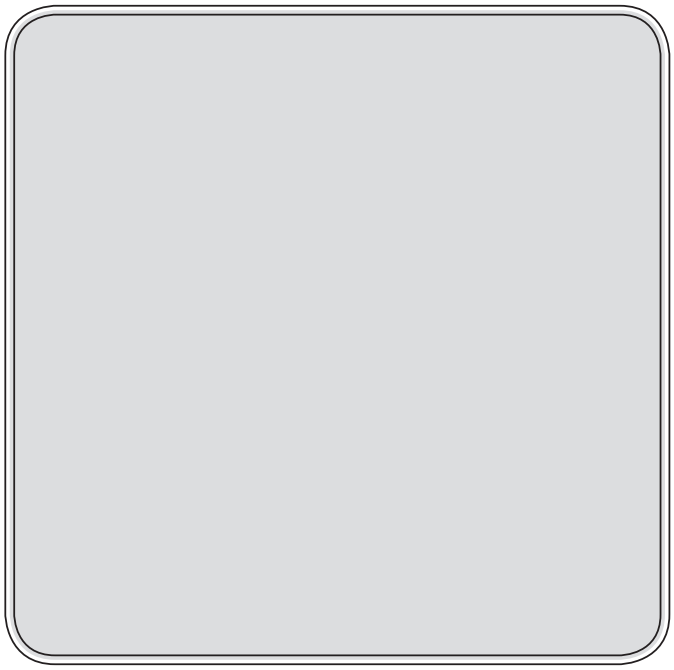
G. Guliyeva
L. Mkrtchyan
V. Kucherov
L. Krikunova
S. Ivanov
A. Kaprin

Summary. Locally advanced cervical cancer (LACC) remains a pressing problem in gynecological oncology, characterized by a high risk of relapse and progression even with standard chemoradiotherapy. Uterine artery chemoembolization (UAC) is considered a promising area of complex treatment, but its effectiveness is largely determined by the clinical and morphological characteristics of the tumor. *Materials and methods*. A retrospective and prospective study was conducted of 108 patients with stage IIA–IIIB LACC who underwent treatment in 2018–2022. The main group (n=60) received UAC followed by chemoradiotherapy (CRT), the control group (n=48) — CRT only. Efficacy was assessed according to RECIST 1.1 criteria, relapse-free survival (RFS) and overall survival (OS) — according to the Kaplan–Meier method. Univariate and multivariate regression analysis and ROC analysis were used to analyze prognostic factors. *Results*. The use of CEMA + CRT provided a significantly higher frequency of complete tumor regression (70.0 % versus 38.0 %; p = 0.001), a significant decrease in the SCC level and a decrease in the residual tumor volume. Three-year RFS was 73.4 % in the main group and 34.7 % in the control (p = 0.003). Independent unfavorable prognostic factors were stage IIIB, tumor volume > 80 cm^3, low differentiation degree (G3), adenocarcinoma and SCC level > 5.5 ng/ml. The constructed prognostic model showed high accuracy (AUC 0.78–0.82; sensitivity 72–80 %; specificity 73–75 %). *Conclusions*. Clinical and morphological characteristics of the tumor are of key importance in predicting the effectiveness of CEMA in patients with MRCC. Their comprehensive consideration allows identifying high-risk groups, personalizing treatment tactics, and justifying the use of CEMA as part of combined therapy programs.

Keywords: Cervical cancer, uterine artery chemoembolization, clinical and morphological characteristics, relapse-free survival, SCC antigen, prognostic model.

Кулиева Гюнель Закир кызы
Врач радиотерапевт, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр радиологии
gunelka2010@yandex.ru
Мкртчян Лиана Сирекановна
Доктор медицинских наук, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр радиологии
Кучеров Валерий Владимирович
Кандидат медицинских наук, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр радиологии
Крикунова Людмила Ивановна
Доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр радиологии
Иванов Сергей Анатольевич
Доктор медицинских наук, профессор, член корреспондент РАН, директор, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр радиологии; ФГАОУ ВО Российский университет дружбы народов
Каприн Андрей Дмитриевич
Доктор медицинских наук, академик РАН, генеральный директор, Национальный медицинский исследовательский центр; Российский университет дружбы народов; Московский научно-исследовательский онкологический институт им. П.А. Герцена — филиал ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр

Аннотация. Местно-распространённый рак шейки матки (МРРШМ) остаётся актуальной проблемой онкогинекологии, характеризующейся высоким риском рецидивов и прогрессирования даже при применении стандартной химиолучевой терапии. Химиоэмболизация маточных артерий (ХЭМА) рассматривается как перспективное направление комплексного лечения, однако её эффективность во многом определяется клинико-морфологическими характеристиками опухоли. *Материалы и методы*. Проведено ретроспективно-проспективное исследование 108 пациенток с МРРШМ стадий IIA–IIIB, проходивших лечение в 2018–2022 гг. Основная группа (n=60) получала ХЭМА с последующей химиолучевой терапией (ХЛТ), контрольная группа (n=48) — только ХЛТ. Эффективность оценивалась по критериям



RECIST 1.1, безрецидивная (БРВ) и общая выживаемость (ОВ) — по методу Каплана–Майера. Для анализа прогностических факторов применялись одно- и многофакторный регрессионный анализ, ROC-анализ. *Результаты*. Применение ХЭМА+ХЛТ обеспечило достоверно более высокую частоту полной регрессии опухоли (70,0 % против 38,0 %; p=0,001), значимое снижение уровня SCC и уменьшение остаточного объёма новообразования. Трёхлетняя БРВ составила 73,4 % в основной группе и 34,7 % в контроле (p=0,003). Независимыми неблагоприятными факторами прогноза явились стадия IIIB, объём опухоли >80 см^3, низкая степень дифференцировки (G3), аденокарцинома и уровень SCC >5,5 нг/мл. Построенная прогностическая модель показала высокую точность (AUC 0,78–0,82; чувствительность 72–80 %; специфичность 73–75 %). *Выводы*. Клинико-морфологические характеристики опухоли имеют ключевое значение в прогнозировании эффективности ХЭМА у пациенток с МРРШМ. Их комплексный учёт позволяет выделять группы высокого риска, персонализировать тактику лечения и обосновывать применение ХЭМА в составе комбинированных программ терапии.

Ключевые слова: рак шейки матки, химиоэмболизация маточных артерий, клинико-морфологические характеристики, безрецидивная выживаемость, SCC-антиген, прогностическая модель.

Введение

Рак шейки матки (РШМ) остаётся одной из наиболее значимых медико-социальных проблем современной онкогинекологии. Несмотря на развитие программ скрининга и широкое внедрение вакцинации против вируса папилломы человека (ВПЧ), заболевание продолжает занимать одно из ведущих мест среди злокачественных новообразований женской репродуктивной системы [1, 2]. По данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно в мире выявляется свыше 600 тысяч новых случаев РШМ, при этом около 340 тысяч женщин умирают от данной патологии [3, 4]. В структуре онкологической заболеваемости у женщин РШМ занимает четвёртое место, уступая лишь раку молочной железы, колоректальному раку и раку лёгкого [5, 6].

Эпидемиологическая ситуация в Российской Федерации остаётся напряжённой. Так, в 2021 году зарегистрировано более 15 тысяч новых случаев РШМ, что составило 5,2 % в общей структуре злокачественных опухолей у женщин [7]. Примечательно, что более 60 % пациенток составляют женщины в возрасте до 50 лет, то есть в периоде активной репродуктивной и трудовой деятельности. Несмотря на некоторое снижение смертности, обусловленное улучшением диагностики и расширением доступности специализированной помощи, в 2021 году от РШМ умерли свыше 5,8 тысяч женщин [7].

Особое значение имеет проблема местнораспространённого рака шейки матки (МРРШМ), характеризующегося инвазией опухоли в параметрий, влагалище или регионарные лимфатические узлы. Более чем у 30 % пациенток заболевание впервые диагностируется на стадии III, причём около половины из них имеют признаки лимфогенного метастазирования [8, 9]. Прогноз у данной категории больных остаётся неблагоприятным даже при применении современных методов терапии, включающих дистанционную и внутриполостную лучевую терапию, химиолучевое и таргетное лечение. При больших размерах опухоли и вовлечении лимфатических узлов риск рецидива и прогрессирования значительно возрастает [10, 11]. Стандартом лечения в настоящее время является сочетанная химиолучевая терапия с использованием препаратов платины, однако её эффективность ограничена высокой токсичностью и отсутствием гарантированного долгосрочного контроля заболевания [12].

В поиске новых терапевтических решений перспективным направлением рассматривается химиоэмболизация маточных артерий (ХЭМА). Метод сочетает локальное введение химиопрепаратов с одновременной ишемизацией опухолевой ткани, что обеспечивает высокую локальную концентрацию цитостатиков при снижении системной токсичности и нарушении кровоснабжения новообразования [13, 14]. Первоначально ХЭМА применялась преимущественно для купирования кровотечений при гинекологических опухолях, однако в последние годы активно исследуется её роль как компонента предлучевой подготовки в рамках радикальных схем лечения [15, 16]. Вместе с тем остаются дискуссионными вопросы оптимального интервала между ХЭМА и химиолучевой терапией, её влияния на безрецидивную выживаемость и критериев отбора пациенток [17, 18].

При этом эффективность химиоэмболизации маточных артерий в составе комплексного лечения может

существенно варьировать в зависимости от индивидуальных особенностей опухолевого процесса. Ключевую роль в прогнозировании исходов играют клинико-морфологические характеристики — стадия заболевания, объём и форма роста опухоли, степень её дифференцировки, морфологический вариант, уровень SCC и ВПЧ-статус. Их оценка необходима для отбора пациенток, которые могут получить наибольшую пользу от применения ХЭМА, а также для персонализации схем терапии.

Цель статьи

Анализ клинико-морфологических характеристик местно-распространённого рака шейки матки как факторов прогноза эффективности химиоэмболизации маточных артерий.

Материалы и методы

Исследование выполнено на базе отделения лучевых и комбинированных методов лечения гинекологических заболеваний МРНЦ им. А.Ф. Цыба — филиала ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России. Работа носила ретроспективно-проспективный характер и была направлена на оценку эффективности и переносимости комбинированного лечения местно-распространённого рака шейки матки (МРРШМ) с использованием химиоэмболизации маточных артерий (ХЭМА).

В исследование включены 108 женщин в возрасте от 24 до 74 лет с морфологически подтверждённым диагнозом рак шейки матки стадий IIA–IIIB (T2a–3bN0–1M0), проходивших лечение в 2018–2022 гг. Средний возраст в основной группе (ХЭМА+ХЛТ) составил 46,9 ± 11,3 года, в контрольной (ХЛТ) — 45,0 ± 10,1 года (p=0,368). Большинство пациенток (66,7 %) находились в репродуктивном возрасте до 49 лет. Все пациентки подписали информированное согласие. Протокол исследования был одобрен локальным этическим комитетом.

Пациентки были разделены на две группы
- основная группа (n=60) — получали ХЭМА с последующим курсом сочетанной химиолучевой терапии (ХЛТ);
- группа контроля (n=48) — получали стандартную радикальную ХЛТ без этапа эмболизации.

Клинико-морфологическая характеристика пациенток

Регулярное наблюдение у гинеколога отмечали лишь 17,6 % больных, при этом каждая четвертая пациентка не посещала врача более 5 лет, что подтверждает высокий уровень запущенности заболевания.

Основные жалобы включали кровянистые выделения и профузные маточные кровотечения, которые встречались у 38,3 % пациенток основной группы и у 6,3 % группы контроля (p <0,05). У трёх женщин (5 %) диагноз РШМ был установлен во время беременности.

Стадия заболевания. Распределение стадий соответствовало классификациям FIGO (2009) и TNM (8-е издание):
- IIA2 — 5 случаев (4,6 %);
- IIB — 20 случаев (18,5 %);
- IIIB — 83 случая (76,9 %).

Примечательно, что в основной группе чаще выявлялись пациентки с T2bN1M0 (43,3 % против 22,9 % в контроле, p=0,04).

Поражение регионарных лимфатических узлов выявлено у 73,3 % пациенток основной группы и у 62,5 % в группе контроля (p=0,29), причём двусторонний характер лимфогенного метастазирования отмечался у 68,2 % и 46,7 % больных соответственно. Морфологическая структура опухоли в целом характеризовалась преобладанием плоскоклеточного рака (90,7 %), в то время как аденокарцинома встречалась значительно реже (9,3 %). В основной группе доминировали опухоли со средней степенью дифференцировки (78,0 %), тогда как в контрольной чаще определялись высокодифференцированные формы (75,0 %; p <0,001).

По характеру роста в обеих группах преимущественно регистрировались смешанные формы опухоли (65,0 % и 72,9 % соответственно), реже эндофитные (18,7–30 %) и экзофитные (5–8 %). Варианты распространения процесса в большинстве случаев включали вагинально-параметральный и вагинально-параметрально-маточный тип инфильтрации (около 30–37 %), при этом двустороннее поражение параметриев диагностировано у 50 % пациенток основной группы и у 62 % в группе контроля.

Средний объём опухоли по данным ультразвукового исследования составил 75,3 ± 24,4 см^3 в основной группе и 69,2 ± 24,2 см^3 в контрольной (p>0,05), наиболее часто регистрировались новообразования объёмом 50–80 см^3 (71–72 %). По данным магнитно-резонансной томографии объём опухоли также оказался несколько выше в основной группе (74,0 ± 31,5 см^3 против 53,2 ± 31,1 см^3), хотя различия не достигли статистической значимости (p=0,066).

Средний уровень опухолевого маркёра SCC до начала лечения составил 12,6 ± 17,3 нг/мл (0,41–70) в основной группе и 10,6 ± 12,0 нг/мл (0,8–33,7) в контрольной, статистически значимых различий не выявлено (p=0,707). Вирус папилломы человека высокого канцерогенного риска определялся у большинства больных: у 87,5 % в основной группе и у 84,6 % в контрольной. Наиболее часто встречался 16-й тип ВПЧ, который выявлялся в 38,3 % и 18,7 % случаев соответственно.

Среди факторов риска обращает на себя внимание высокая частота курения: регулярный стаж курения имели 47,2 % женщин, при этом каждая третья пациентка курила более 20 лет; различий между группами выявлено не было. Сопутствующая патология диагностирована у 65,8 % пациенток, чаще всего это были заболевания эндокринной (20,4 %) и сердечно-сосудистой системы (19,4 %). Основные характеристики отображены в сводной таблице 1.

Таблица 1.

Основные клинико-морфологические характеристики пациенток

Характеристика	Основная группа (ХЭМА+ХЛТ, n=60)	Контрольная группа (ХЛТ, n=48)	p-value
Возраст, лет (M±SD)	46,9 ± 11,3	45,0 ± 10,1	0,368
Пациентки <49 лет, %	72 %	62 %	н/д
Основные жалобы: кровотечения, %	38,30 %	6,30 %	<0,05
Стадия IIA2	5,00 %	2,10 %	<0,05
Стадия IIB	15,00 %	23,00 %	>0,05
Стадия IIIB (в т.ч. T2bN1M0)	80,0 % (T2bN1M0 — 43,3 %)	75,0 % (T2bN1M0 — 22,9 %)	0,04*
Поражение лимфоузлов, %	73,30 %	62,50 %	0,29
Двустороннее поражение ЛУ, %	68,20 %	46,70 %	>0,05
Плоскоклеточный рак	88,00 %	94,00 %	0,507
Аденокарцинома	12,00 %	6,00 %	>0,05
Степень дифференцировки G1	10,00 %	75,00 %	<0,001
Степень дифференцировки G2	78,00 %	10,00 %	<0,001
Степень дифференцировки G3	3,00 %	8,00 %	0,403
Смешанная форма роста	65,00 %	72,90 %	>0,05
Эндофитная форма роста	30,00 %	18,70 %	>0,05
Экзофитная форма роста	5,00 %	8,30 %	>0,05
Объём опухоли (УЗИ), $см^3$ (M±SD)	75,3 ± 24,4	69,2 ± 24,2	>0,05
Объём 50–80 $см^3$, %	71,70 %	70,80 %	>0,05
SCC, нг/мл (M±SD)	12,6 ± 17,3	10,6 ± 12,0	0,707
ВПЧ (+), %	87,50 %	84,60 %	>0,05
Курение, %	47,00 %	46,00 %	>0,05
Сопутствующая патология, %	68,30 %	68,80 %	>0,05

Анализ клинико-морфологических характеристик показал, что группы были сопоставимы по возрасту, распространённости заболевания, форме роста опухоли, объёму по данным УЗИ и уровню SCC. Существенные различия отмечены по частоте профузных кровотечений, большей доле пациенток молодого возраста, по доле пациенток со стадией T2bN1M0 — перечисленные признаки больше в основной группе; а также по степени дифференцировки опухоли: в основной группе преобладали опухоли G2, тогда как в контрольной чаще встречались высокодифференцированные формы (G1).

Методика химиоэмболизации маточных артерий

Процедура выполнялась в условиях рентгеноперационной с использованием ангиографической установки. Доступ осуществлялся по методике Сельдингера через общую бедренную артерию под местной анестезией. После пункции и установки интродьюсера производилась катетеризация внутренней подвздошной артерии, затем — суперселективная катетеризация маточной артерии с обеих сторон с помощью микрокатетеров.

После подтверждения положения катетера ангиографически осуществлялась инфузия химиопрепарата — цисплатина в дозе 50 мг/$м^2$, разведённого в изотоническом растворе. Медленное введение препарата обеспечивало высокую локальную концентрацию цитостатика в опухолевом очаге при минимальном системном воздействии.

Завершающим этапом выполнялась эмболизация питающих сосудов с использованием йодсодержащего контрастного масляного препарата (липиодол), который создавал эффект «депо» для химиопрепарата и одновременно вызывал ишемию опухолевой ткани за счёт прекращения кровотока. В ряде случаев для усиления ишемизирующего эффекта дополнительно применялись микросферы или частицы поливинилалкоголя.

По завершении процедуры проводился контрольный ангиографический снимок для подтверждения адекватности окклюзии и исключения нежелательных коллатеральных путей кровоснабжения опухоли. В раннем послеоперационном периоде пациентки находились под динамическим наблюдением в условиях стационара для своевременного выявления возможных осложнений (болевой синдром, лихорадка, ишемические реакции органов малого таза).

Через 10–14 дней после вмешательства выполнялись контрольные методы визуализации (УЗИ с допплерометрией и/или МРТ), что позволяло оценить изменения в кровоснабжении опухоли, динамику её размеров и наличие зон ишемического некроза. На основании полученных данных принималось решение о начале сле-

дующего этапа лечения — сочетанной химиолучевой терапии.

ХЛТ проводилась в рамках радикального курса, который включал дистанционное облучение области малого таза в режиме фракционирования 2,0 Гр до суммарной дозы 46–50 Гр с одновременным еженедельным введением цисплатина (40 мг/м^2), а при метастатическом поражении лимфоузлов — с последующим «бустом» до 56–60 Гр. Далее выполнялась внутриполостная брахитерапия источником Ir-192 (4 фракции по 7–7,5 Гр) до суммарной дозы 28–30 Гр. Общая эквивалентная доза на первичный очаг составляла 80–90 Гр.

Ответ опухоли оценивали по критериям RECIST 1.1. (полный ответ, частичный ответ, стабилизация, прогрессирование). Безрецидивная (БРВ) и общая выживаемость (ОВ) рассчитывались по методу Каплана–Майера. Переносимость терапии оценивалась по шкалам RTOG/EORTC и CTCAE v.5.0.

Для статистического анализа использовались методы параметрической и непараметрической статистики (t-тест, критерий Манна–Уитни, χ^2, точный критерий Фишера). Для оценки прогностической значимости факторов применялись одно- и многофакторный регрессионный анализ, ROC-анализ. Различия считали статистически значимыми при $p \leq 0,05$. Непосредственная эффективность лечения в зависимости от клинико-морфологических характеристик.

Результаты

Сравнительный анализ показал преимущество использования ХЭМА в сочетании с ХЛТ по сравнению со стандартной радикальной ХЛТ. Полная регрессия опухоли достигнута у 70,0 % пациенток основной группы против 38,0 % в группе контроля (p=0,001), что соответствовало почти четырёхкратному увеличению шанса достижения полного ответа (OR=3,89; 95 % ДИ: 1,74–8,69). Частичная регрессия, напротив, чаще наблюдалась в контрольной группе (62,0 % против 30,0 %).

Дополнительно было установлено, что возраст оказывал влияние на результаты терапии в основной группе: у женщин старше 44 лет вероятность полной регрессии была значительно выше (OR=3,08; 95 % ДИ: 1,39–6,84; p=0,005).

Анализ эффективности в зависимости от стадии заболевания показал, что при стадиях IIA2 и IIB показатели полной регрессии были сопоставимы между группами, однако при IIIB стадии различия оказались статистически значимыми: 64,6 % против 27,8 % (p <0,001).

Зависимость результатов от морфологического типа опухоли продемонстрировала более высокую эффективность ХЭМА у больных с плоскоклеточным раком (73,6 % против 43,2 %; p=0,004), тогда как при аденокарциноме статистически значимых различий не выявлено. Среди форм роста наибольший эффект отмечался при экзофитной форме: полная регрессия достигнута у 100 % пациенток основной группы против 25 % в контроле (p <0,05).

Уровень SCC после лечения снизился в основной группе с 9,3 ± 14,4 до 1,7 ± 3,8 нг/мл (p=0,002), тогда как в контрольной статистически значимого снижения не отмечено (p=0,433). Конечные значения SCC также различались между группами: 1,7 ± 3,8 против 6,5 ± 2,5 нг/мл (p=0,011).

По данным УЗИ, объём опухоли уменьшился с 75,3 ± 24,4 до 14,6 ± 7,7 см^3 в основной группе и с 69,5 ± 24,4 до 25,5 ± 11,1 см^3 в контрольной (p=0,003). Данные МРТ подтвердили значимое уменьшение объёма опухоли у пациенток, получавших ХЭМА.

Через три года наблюдения общая выживаемость составила 92,1 % в основной группе и 66,7 % в группе контроля (p=0,084). Хотя различие не достигло статистической значимости, тенденция свидетельствует в пользу комбинированного подхода.

Более выраженные различия отмечены в безрецидивной выживаемости: на сроке 3 лет БРВ составила 73,4 % в основной группе против 34,7 % в группе контроля (p=0,003). Анализ показал, что низкая степень дифференцировки (G3), объём опухоли >80 см^3 и уровень SCC >5,5 нг/мл были независимыми неблагоприятными прогностическими факторами.

Частота прогрессирования после ХЭМА+ХЛТ составила 30,0 % против 64,6 % в группе контроля (p <0,001). При этом локорегионарные рецидивы отмечались у 20,0 % пациенток основной группы и у 45,8 % контрольной (p=0,005). Отдалённые метастазы встречались чаще в группе контроля (18,8 % против 10,0 %), но различия не достигли статистической значимости (p=0,192).

Основным побочным эффектом терапии стала индуцированная миелосупрессия, которая отмечалась в обеих группах, однако чаще у пациенток основной группы (лейкопения у 78,3 % против 37,5 %). Лучевые реакции со стороны слизистой шейки матки также встречались чаще после ХЭМА (51,6 % против 31,2 %; p=0,02), но преимущественно не превышали II степени и не требовали прекращения терапии. Поздние осложнения (циститы, ректиты, эпителииты) встречались с одинаковой частотой в обеих группах и носили управляемый характер.

Основные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Сводные результаты исследования в группах

Показатель	Основная группа (ХЭМА+ХЛТ, n=60)	Контрольная группа (ХЛТ, n=48)	p-value
Полная регрессия опухоли	70,0 % (42)	38,0 % (18)	0,001
Частичная регрессия опухоли	30,0 % (18)	62,0 % (30)	0,001
Снижение уровня SCC после лечения	9,3 → 1,7 нг/мл (p=0,002)	12,9 → 6,5 нг/мл (p=0,433)	0,011
Остаточный объём опухоли (УЗИ)	75,3 → 14,6 см³ (p<0,001)	69,5 → 25,5 см³ (p=0,002)	0,003
3-летняя общая выживаемость (ОВ)	92,10 %	66,70 %	0,084
3-летняя безрецидивная выживаемость (БРВ)	73,40 %	34,70 %	0,003*
Прогрессирование заболевания (всего)	30,0 % (18)	64,6 % (31)	<0,001
Локорегионарные рецидивы	20,0 % (12)	45,8 % (22)	0,005
Отдалённые метастазы	10,0 % (6)	18,8 % (9)	0,192
Лейкопения (любая степень)	78,30 %	37,50 %	<0,05
Лучевые реакции слизистой (эпителииты)	51,60 %	31,20 %	0,02

Таким образом, использование ХЭМА в составе комплексного лечения позволяет достичь большей частоты полной регрессии опухоли, выраженного снижения уровня SCC и уменьшения остаточного объёма опухоли. Наиболее важным клиническим результатом стало достоверное улучшение 3-летней безрецидивной выживаемости и снижение частоты локорегионарных рецидивов. При этом профиль осложнений оставался приемлемым и не препятствовал проведению радикальной программы лечения.

Дополнительно был проведен анализ прогностических факторов, в результате чего было показано, что ряд клинико-морфологических характеристик имел значимое влияние на эффективность лечения. Так, при стадии IIIB вероятность достижения полной регрессии была достоверно выше в основной группе (64,6 % против 27,8 %; p<0,001), что подчёркивает преимущества ХЭМА у пациенток с распространёнными формами заболевания. Объём опухоли >80–85 см³ ассоциировался с повышенным риском неполного ответа и снижением безрецидивной выживаемости: у таких больных частота рецидивов возрастала более чем в два раза.

Степень дифференцировки также показала прогностическую значимость: при G3 частота прогрессирования была выше, а трёхлетняя БРВ снижалась почти в три раза по сравнению с G1–G2 (25 % против 87 %; p <0,001). Морфологический вариант опухоли оказал влияние на исходы: при плоскоклеточном РШМ частота полной регрессии составила 73,6 % в основной группе, тогда как при аденокарциноме — лишь 42,9 %.

Особое значение имел уровень SCC до начала терапии. При значениях выше 5,5 нг/мл риск рецидива возрастал в 2,1 раза (p=0,008), тогда как у пациенток с более низкими показателями трёхлетняя БРВ достигала 89,5 %.

Таким образом, стадия заболевания, объём и морфологические характеристики опухоли, степень дифференцировки и уровень SCC могут рассматриваться как ключевые предикторы эффективности ХЭМА. Их комплексный учёт позволяет выделить группу пациенток, наиболее чувствительных к данному виду терапии, и оптимизировать подходы к комбинированному лечению.

Прогностическая модель

На основании одно- и многофакторного анализа была построена модель вероятности неполного ответа опухоли на комбинированное лечение. Независимыми прогностически значимыми факторами оказались — стадия заболевания IIIB, объём опухоли >80 см³, низкая степень дифференцировки (G3), аденокарцинома и уровень SCC >5,5 нг/мл.

Модель продемонстрировала высокую точность — площадь под ROC-кривой (AUC) составила 0,78–0,82 при чувствительности 72–80 % и специфичности 73–75 %. Это говорит о возможности выделения групп высокого риска и персонализированного выбора тактики лечения, включая обоснование применения ХЭМА.

Для дополнительной верификации был проведён многофакторный регрессионный анализ, результаты которого представлены в таблице 3.

Таблице 3.

Влияние клинико-морфологических факторов

Фактор-прогноз	OR / HR (95 % ДИ)	p
Стадия IIIB	2,8 (1,4–5,6)	0,005
Объём опухоли >80 см³	2,6 (1,7–3,9)	<0,001
Степень дифференцировки G3	2,9 (1,9–4,4)	<0,001
Аденокарцинома	2,3 (1,1–4,6)	0,025
SCC >5,5 нг/мл	2,1 (1,4–3,2)	0,008

На рисунке 1 изображена ROC-кривая прогностической модели.



Рис. 1. ROC-кривая прогностической модели

Характеристики модели AUC (ROC) = 0,78–0,82; Чувствительность = 72–80 %; Специфичность = 73–75 %.

Таким образом, полученная модель обладает высокой прогностической ценностью и позволяет на основании совокупности клинико-морфологических характеристик выделять подгруппы пациенток с повышенным риском рецидива. Применение данного подхода открывает перспективы для персонализации лечения и более обоснованного выбора химиоэмболизации маточных артерий в составе комбинированных программ терапии местно-распространённого рака шейки матки.

Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют высокую прогностическую ценность клинико-морфологических характеристик у пациенток с МРРШМ, получавших комбинированное лечение с включением химиоэмболизации маточных артерий.

Наше исследование показало, что неблагоприятными предикторами эффективности ХЭМА+ХЛТ являются IIIB стадия, объем опухоли более 80 см^3, низкая степень дифференцировки (G3), аденокарцинома и уровень SCC >5,5 нг/мл. Эти данные согласуются с литературными сведениями о значимости стадии и объема опухоли как ключевых факторов риска прогрессирования [19, 20, 21]. В метаанализах и крупных когортных исследованиях также показано, что низкая степень дифференцировки ассоциирована со снижением опухоль-специфической выживаемости [22].

Кроме того, важным результатом нашего исследования стало подтверждение роли SCC как биомаркера прогноза: пациенты с исходным уровнем >5,5 нг/мл имели более худшие показатели БРВ. Аналогичные результаты приводят Choi K.H. и соавт. (2019), а также Ryu H.K. и др. (2015), где повышение SCC до и после лечения предсказывало рецидив [23, 24].

В дополнение, сравнение с отечественными данными (Косенко И.А., 2012; Бабаева Н.А., 2018) показывает близкие тенденции — преобладание плоскоклеточного РШМ и худший прогноз при аденокарциномах [25, 26]. По нашим результатам также получилось, что аденокарцинома ассоциировалась со снижением БРВ, что соответствует данным зарубежных авторов [27].

Относительно тактики лечения, в литературе обсуждается возможность применения ХЭМА в комбинации с ХЛТ как способа повышения локального контроля и снижения риска кровотечений [28, 29]. В нашей когорте включение ХЭМА позволило достичь более высокой частоты полной регрессии и трехлетней БРВ по сравнению с группой ХЛТ. Эти данные дополняют немногочисленные публикации, подтверждающие перспективность ХЭМА в комплексных программах терапии [30, 31].

Сопоставление полученных данных с литературой свидетельствует, что учет клинико-морфологических характеристик имеет ключевое значение для прогнозирования исходов комбинированного лечения МРРШМ. Выявленные факторы могут служить основой для персонализации подходов к выбору схемы терапии, включая обоснование применения ХЭМА.

Заключение

Клинико-морфологические характеристики опухоли являются определяющими факторами прогноза при применении химиоэмболизации маточных артерий у пациенток с местно-распространённым раком шейки матки. Учёт стадии заболевания, объёма и степени дифференцировки опухоли, морфологического варианта и уровня SCC позволяет более точно прогнозировать эффективность лечения и выделять группы высокого риска. Это открывает возможности для персонализированного выбора тактики терапии и оптимизации комбинированных программ лечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Arbyn M., Weiderpass E., Bruni L., et al. Estimates of incidence and mortality of cervical cancer in 2018: a worldwide analysis // Lancet Glob Health. — 2020. — Vol. 8, №2. — P. e191–e203.
2. Sung H., Ferlay J., Siegel R.L., et al. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries // CA Cancer J Clin. — 2021. — Vol. 71, №3. — P. 209–249.

3. Bray F., Ferlay J., Soerjomataram I., et al. Global cancer statistics 2020 // CA Cancer J Clin. — 2021. — Vol. 71. — P. 209–249.
4. World Health Organization. Cervical cancer. — WHO, 2020. URL: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cervical-cancer
5. Vu M., Yu J., Awolude O.A., Chuang L. Cervical cancer worldwide // Curr Probl Cancer. — 2018. — Vol. 42, №5. — P. 457–465.
6. Zhang X.R., He L., Lu L., et al. Epidemiological trends of cervical cancer in China: an age-period-cohort analysis // J Cancer. — 2021. — Vol. 12, №3. — P. 716–726.
7. Каприн А.Д., Старинский В.В., Шахзадова А.О. Злокачественные новообразования в России в 2023 году (заболеваемость и смертность). М.: МНИОИ им. П.А. Герцена — филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2024. 276 с.
8. Cohen P.A., Jhingran A., Oaknin A., Denny L. Cervical cancer // Lancet. — 2019. — Vol. 393. — P. 169–182.
9. Liu Y., Li H., Yang G., et al. Current status and future perspectives of cervical cancer treatment // J Cancer Res Clin Oncol. — 2022. — Vol. 148. — P. 1381–1393.
10. Mayadev J.S., Atienza T., Hendry W., et al. Radiation therapy for cervical cancer: executive summary of an ASTRO clinical practice guideline // Pract Radiat Oncol. — 2022. — Vol. 12, №1. — P. 13–25.
11. Shrivastava S., Mahantshetty U., Engineer R., et al. Critical analysis of outcomes in patients with recurrent cervical cancer // Int J Gynecol Cancer. — 2018. — Vol. 28, №5. — P. 1025–1030.
12. Gopu P., Rathod S., Mahantshetty U. A review of contemporary evidence on chemoradiotherapy in locally advanced cervical cancer // Int J Gynecol Cancer. — 2021. — Vol. 31, №7. — P. 962–971.
13. Важенин А.В., Куркин Н.В., Бабаева Н.А., и др. Эмболизация маточных артерий в комплексном лечении больных с раком шейки матки // Вестник современной клинической онкологии. — 2011. — Т. 4, №3. — С. 12–16.
14. Куркин Н.В., Важенин А.В., Солодкий В.А. Химиоэмболизация как компонент комбинированного лечения местнораспространённого рака шейки матки // Онкогинекология. — 2019. — Т. 17, №1. — С. 23–27.
15. Nogueira-García D., Huber S., Rennings A.J., et al. Uterine artery embolization for gynecologic malignancies: indications and outcomes // Cardiovasc Intervent Radiol. — 2015. — Vol. 38. — P. 588–597.
16. Aishanjiang D., Aili A., Azhati B., et al. Comparative efficacy and safety of interventional chemoembolization and chemoradiotherapy for cervical cancer // Int J Clin Oncol. — 2021. — Vol. 26, №8. — P. 1557–1565.
17. Wang S.G., Liu Y.Y., Li H.Y., et al. Downregulation of survivin mRNA expression in cervical cancer tissue by transcatheter arterial chemoembolization // Asian Pac J Cancer Prev. — 2017. — Vol. 18, №10. — P. 2799–2804.
18. Tanaka T., Terai Y., Ono Y.J., et al. Preoperative chemoembolization improves prognosis in patients with stage IB2-IIB cervical cancer // Int J Clin Oncol. — 2018. — Vol. 23, №5. — P. 890–897.
19. Sun C., Liu H., Zhang Y. et al. Tumor volume regression during chemoradiotherapy as a prognostic factor in patients with locally advanced cervical cancer. Oncol. Lett. 2022;24(1):238.
20. Lee K.C., Chen C.C., Wang L. et al. Tumor volume change during definitive chemoradiotherapy and its impact on outcomes in cervical cancer patients. Gynecol. Oncol. 2017;147(3):522–528.
21. Peng Q.H., Han L., Li L. et al. Prognostic factors for recurrence in patients with locally advanced cervical cancer treated with concurrent chemoradiotherapy. BMC Cancer. 2022; 22:563.
22. Matsuo K., Machida H., Mandelbaum R.S. et al. Prognostic significance of histologic type in early-stage cervical cancer: a population-based study. Gynecol. Oncol. 2018;149(3):484–490.
23. Choi K.H., Kim J.H., Park J.Y. et al. Prognostic value of pretreatment squamous cell carcinoma antigen in patients with cervical cancer treated with concurrent chemoradiotherapy. Int. J. Gynecol. Cancer. 2019;29(3):512–519.
24. Ryu H.K., Baek J.S., Kang W.D. et al. Prognostic value of squamous cell carcinoma antigen in patients with locally advanced cervical cancer treated with chemoradiotherapy. Obstet. Gynecol. Sci. 2015;58(2):128–136.
25. Косенко И.А., Кузнецов В.В., Митрофанова И.В. и др. Комплексное лечение больных местнораспространённым раком шейки матки с использованием химиоэмболизации маточных артерий. Вопросы онкологии. 2012;58(6):729–734.
26. Бабаева Н.А., Солодкий В.А., Иванов С.А. и др. Эффективность химиоэмболизации маточных артерий в комбинированном лечении больных раком шейки матки. Онкология. Журнал им. П.А. Герцена. 2018;7(5):36–41.
27. Bullard T., Cohen P.A., McKenzie N.D. et al. Adenocarcinoma of the cervix: a review of prognostic factors and treatment outcomes. Gynecol. Oncol. 2019;152(1):172–178.
28. Tanaka T., Morishige K., Tanaka Y. et al. Impact of transarterial chemoembolization on survival in patients with locally advanced cervical cancer. J. Vasc. Interv. Radiol. 2018;29(3):400–407.
29. Aishanjiang D., Li X., Wu H. et al. Clinical outcomes of uterine artery chemoembolization combined with radiotherapy in cervical cancer patients. Int. J. Gynecol. Cancer. 2021;31(6):867–874.
30. Куркин Н.В., Павлов В.Н., Воронин С.Н. и др. Химиоэмболизация маточных артерий в комплексном лечении больных раком шейки матки. Акушерство и гинекология. 2019; 8:92–97.
31. Важенин А.В., Крикунова Л.И., Дудко Е.А. и др. Химиоэмболизация маточных артерий в лечении злокачественных опухолей шейки матки. Опухоли женской репродуктивной системы. 2012;8(3):34–38.

© Кулиева Гюнель Закир кызы (gunelka2010@yandex.ru); Мкртчян Лиана Сирекановна; Кучеров Валерий Владимирович; Крикунова Людмила Ивановна; Иванов Сергей Анатольевич; Каприн Андрей Дмитриевич
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.22

ОЦЕНКА ВЕГЕТАТИВНОЙ И КАРДИОРЕСПИРАТОРНОЙ СИСТЕМЫ У ЖЕНЩИН ДЕТОРОДНОГО ВОЗРАСТА С ВОСПАЛИТЕЛЬНЫМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ ОРГАНОВ МАЛОГО ТАЗА

FEATURES OF DIAGNOSIS OF ANEMIA SYNDROME IN WOMEN WITH ACUTE INFLAMMATORY DISEASES OF THE PELVIC ORGANS

M. Leshcheva
I. Korotkih
L. Korichkina
O. Poselugina

Summary. Pelvic inflammatory disease (PID) is currently one of the most common gynecological pathologies [1]. According to WHO estimates, approximately 450 million cases are registered annually, the majority of which occur in women of reproductive age (18 to 24 years) [2,3]. According to author N.A. Burova, PID occurs in 65 % of inpatient cases and 30 % of outpatient cases [4]. The most common form is salpingo-oophoritis, which is often accompanied by anemia [5]. The combination of PID and anemia requires a more competent approach to diagnosis and treatment by obstetricians and gynecologists.

Keywords: women, reproductive age, inflammatory diseases of the pelvic organs, salpingoophoritis, heavy menstruation, anemic syndrome.

Лещева Мария Юрьевна
Ассистент, ФГБОУ ВО Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко
mleshcheva@vrngmu.com
Коротких Ирина Николаевна
доктор медицинских наук, профессор, ФГБОУ ВО Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко
korotkih_1950@mail.ru
Коричкина Любовь Никитична
доктор медицинских наук, профессор, ФГБОУ ВО Тверской государственный медицинский университет
lnkor@yandex.ru
Поселюгина Ольга Борисовна
доктор медицинских наук, профессор, ФГБОУ ВО Тверской государственный медицинский университет
poselubina@mail.ru

Аннотация. Воспалительные заболевания органов малого таза (ВЗОМТ) в структуре гинекологической патологии занимают одно из лидирующих мест [1]. Каждый год регистрируется примерно 450 млн случаев заболеваемости, большая часть из которых приходится на пациенток репродуктивного возраста от 18 до 24 лет [2,3]. Согласно данным автора Буровой Н.А., ВЗОМТ встречаются в 65 % стационарных и 30 % амбулаторных случаев [4]. Самой распространенной формой при этом являются сальпингоофориты, которые зачастую сопровождаются анемиями [5]. Сочетание ВЗОМТ и анемии требует от врача акушер-гинеколога более грамотного подхода к диагностике и лечению. Представляет интерес изучение индексов вегетативной и кардиореспираторной системы при сочетанной патологии: анемии и острого сальпингоофорита у женщин детородного возраста.

Ключевые слова: женщины, репродуктивный возраст, сальпингоофориты, анемический синдром, индексы кардиореспираторной и вегетативной системы.

Введение

Анемия является одним из самых распространенных гематологических заболеваний, которое существенно снижает качество жизни пациентов, усугубляет тяжесть сопутствующих заболеваний [6]. По данным различных авторов: Доброхотовой Ю.Э. [7] Стуклова Н.И. [8] анемия встречается более чем у 60 % женщин репродуктивного возраста. При этом стоит отметить, что многие из гинекологических заболеваний сопровождаются анемическим синдромом, одними из которых являются ВЗОМТ [5]. Известно, что при гинекологической патологии [9] изменяется функция вегетативной и кардиореспираторной системы, меняется психоэмоциональное состояние и лечение зависит от характера отклонений состояния симпатоадреналовой системы. ВЗОМТ [10] сопровождаются психовегетативным стрессом, установлено, что острые воспалительные за-

болевания придатков матки требуют восстановительного лечения, при этом доказан положительный седативный эффект воздействия зеленого света на состояние женщин. Авторы (Сафоничева О.Г., Троицкий М.С., Митюшкина О.А., Дронова Е.В., 2015) описывают психосоматические подходы в лечении пациентов при соматоформных расстройствах, указывают, что клиническая картина адаптационных постстрессовых расстройств разнообразна и составляет синдромокомплексы в различных сочетаниях, при этом психомоторные и вегетативные проявления рассматривают в виде ответной реакции [11]. В литературе описывается психосоматический статус при синдроме хронической тазовой боли у женщин [12], предлагается включать в лечение препараты, купирующие психосоматическую составляющую синдрома. Однако мы не нашли в доступной литературе исследований индексов вегетативной и кардиореспираторной системы у женщин репродуктивного возраста при остром сальпингоофорите.

Целью данной работы является оценка индексов вегетативной и кардиореспираторной системы у женщин детородного возраста с острым сальпингоофоритом.

Материал и методы исследования

Было обследовано 33 пациентки репродуктивного возраста от 19 до 38 лет с верифицированным диагнозом острого сальпингоофорита, которые поступили по скорой медицинской помощи в гинекологическое отделение № 3 Воронежской областной клинической больницы № 1 г. Воронежа. Критериями включения были: информированное добровольное согласие пациенток на проведение исследования, возраст пациенток от 18 до 45 лет, наличие острого сальпингоофорита. У 45,5 % (15) пациенток было выявлено снижение Нв менее 120 г/л. В связи с этим, все женщины были разделены характеру менструации на 2 группы, в первую включили 18 женщин (средний возраст 27,0 ± 8,5 лет) женщин с нормальной менструацией, во вторую — 15 (средний возраст 30,9 ± 7,5 года) с обильной менструацией. Критериями исключения стали: заболевания почек, желудочно-кишечного тракта, B_{12}- и фолиево-дефицитные анемии, гемолитическая анемия, наследственные анемии, онкопатология, ревматические болезни, органические нарушения сердечного ритма, сердечные заболевания, обострения хронических болезней дыхательной системы, отсутствие специальных диет.

У всех пациенток были подробно собраны жалобы, изучен акушерско-гинекологический и соматический анамнез. Проведена оценка общего клинического анализа крови: гемоглобина (Hb, г/л), эритроцитов (Э $x10^{12}$ /л), гематокрита (НСТ, %), содержание гемоглобина в эритроците (МСН, пг), средней концентрации гемоглобина в эритроците, (МСНС, г/л), показатель среднего объема эритроцитов (MCV, фл), ширины распределения эритроцитов, (RDW, %), скорости оседания эритроцитов (СОЭ, мм/ч), количества тромбоцитов (Т, $x10^9$/л), среднего объема тромбоцитов (MPV, фл), ширины распределения тромбоцитов (PDW), тромбокрита (РСТ, %), количества лейкоцитов (Л, $x10^9$/л), сегментоядерных нейтрофилов (с/я Н, абс., %), палочкоядерных нейтрофилов (п/я Н, абс., %), лимфоцитов (ЛФ, абс., %), средних клеток (%); результаты биохимического анализа: уровень сывороточного железа (СЖ, мкмоль/л), ферритина (мкг/л), общего белка (г/л), С-реактивного белка (СРБ, мг/л), аспарататаминотрансферазы (АСТ, МЕ/л.), аланинаминотрансферазы (АЛТ, МЕ/л), билирубина (ммоль/л), глюкозы (ммоль/л), креатинина (мкмоль/л), альфы-амилазы общей (МЕ/л), мочевины (ммоль/л). Были рассчитаны показатели вегетативных индексов Кердо и Хильдебрандта, а также кардиореспираторные: тип саморегулирования кровообращения, коэффициент экономичности кровообращения, уровень физического состояния, адаптационный потенциал системы кровообращения [13].

Вегетативный индекс Кердо (ВИК) рассчитывался по формуле (Иванов и др., 2017):

$$(1 — А Д / ЧСС) \times 100,$$

АД — величина диастолического давления,
ЧСС — частота сердечных сокращений в минуту

Пределы нормальных значений — –1,0, +1-нормотония, абсолютное равновесие ВНС, до –15 и до +15-нормотония, +16 и более симпатикотония, –16 и менее ваготония.

Индекс Хильдебрандта рассчитывали по формуле (Фомягиной Н.В., Свешникова А.А, 2005):

$$Q = ЧСС / ЧД$$

ЧСС — частота сердечных сокращений в минуту,
ЧДД — частота дыхательных движений в минуту.

Пределы нормальных значений

Тип саморегуляирования кровообращения определяли по формуле (Мельник С.Н., Мельник В.В. 2019):

$$ТСК=(ДАД/ЧСС) \times 100$$

ТСК — тип саморегулирования кровообращения
ДАД — диастолическое артериальное давление
ЧСС — частота сердечных сокращений

Пределы нормальных значений: менее 90-сердечный, 90–110 — сердечно-сосудистый, более 110 — сосудистый.

Расчет коэффициента экономичности кровообращения проводили по следующей формуле (Тулякова О.В., Авдеева М.С., Смирнова А.А., 2021):

$$КЭК = (САД – ДАД) \times ЧСС$$

КЭК — коэффициент экономичности кровообращения
САД — систолическое артериальное давление
ДАД — диастолическое артериальное давление
ЧСС — частота сердечных сокращений

Пределы нормальных значений: 2500–3000

Уровень физического состояния определяли по формуле Е.А. Пироговой (1985 г.):

$$УФС= (700–3ЧСС–2,5АДср.–0,28МТ) /(350–2,6В+0,21Р),$$

АД ср. — артериальное давление среднее
АД = ДАД+1/3 разности САД-ДАД.
МТ — масса тела
В — возраст
Р — рост
АД — артериальное давление
САД — систолическое артериальное давление
ДАД — диастолическое артериальное давление

Пределы нормальных значений: низкий — 0,157–0,260, ниже среднего — 0,261–0,365, средний — 0,366–0,475, выше среднего — 0,476–0,575, высокий> 0,576

Адаптационный потенциал системы кровообращения определяли по формуле (Р.М. Баевского 1987):

$$АП=0,011ЧСС+0,014САД+0,009МТ – 0,009Р+0,014В – 0,27$$

МТ — масса тела
Р — рост
В — возраст
ЧСС — частота сердечных сокращений
САД — систолическое артериальное давление

Пределы нормальных значений: показатель равно или больше 2,6–3,1 — напряжение адаптации, 3,1–3,59 — адаптация неудовлетворительная, 3,6 и больше — срыв адаптации и снижение резервов сердечно-сосудистой системы.

Индекс Робинсона рассчитывали по формуле (Этенко и др., 2013):

$$ИР=ЧСС \times САД/100$$

ЧСС — частота сердечных сокращений
САД — систолическое артериальное давление

Пределы нормальных значений: менее 70 баллов — отличное состояние сердца и сосудов, при 70–85 баллов — выше среднего, 85 — 95 баллов — среднее, 95 — 110 — ниже среднего, при более или равно 110 — имеются серьезные нарушения в кардиомиоцитах из-за гипоксических нарушений.

Для статистического анализа использовали программу Microsoft Office Exel 2016. Данные представляли, как среднее (M) ± стандартное отклонение (SD), в абсолютном (абс.) и процентном (%) отношении. Для сравнения применяли критерий Стьюдента, критерий хи-квадрата. Достоверность различий между группами определялась при уровне безошибочного прогноза более 95 %.

Результаты и их обсуждение

При поступлении в гинекологическое отделение женщины предъявляли следующие жалобы: повышение температуры тела свыше 38°С, болезненные ощущения внизу живота, неприятные выделения из половых путей, болезненный половой контакт (диспареуния).

Представленные результаты (таблица 1) показали, что только во 2-й группе по отношению к 1-й, наблюдалось нарушение менструальной функции в виде обильных менструаций (100,0 %), продолжительностью 7–8 дней (66,7 %), цикл 30-35 дней (40,0 %) и более 35 дней (46,7 %). Диспареуния отмечена во 2-й группе (100,0 %) и в 1-й (61,1 %, p=0,009).

Во 2-й группе, по сравнению с 1-й, количество сопутствующих заболеваний было больше, они включили эрозию шейки матки (соответственно 73,3 % против 27,8 %, p=0,015), фиброзно-кистозная мастопатия (40,0 % против 5,5 %, p=0,03), рубец на матке (40,0 % против 5,5 %, p=0,03), хронический синусит (66,7 % против 22,2 %, p=0,03), миопия (60,0 % против 22,2 %, p=0,05), остеохондроз (80,0 % против 11,1%, p=0,02), соматоформная дисфункция вегетативной нервной системы (СФДВНС, 100,0 % против 11,1 %, p=0,001). Таким образом, у женщин детородного возраста во 2-й группе, кроме обильных менструаций, отмечены другие нарушения менструальной функции и существенно чаще отмечается сопутствующая соматическая патология и в 100,0 % случаев отмечается СФДВНС в анамнезе.

При гинекологическом осмотре у пациенток отмечены болезненность в области придатков матки, болезненные тракции шейки матки, серозные выделения из половых путей.

Результаты клинического анализа крови (таблица 2) показали, что во 2-й группе по отношению к 1-й концентрация гемоглобина (Hb, p=0,0006), гематокрита (Ht, p=0,02), среднего содержания гемоглобина в эритроци-

Таблица 1.

Частота симптомов, показатели менструальной функции, количество сопутствующих заболеваний у пациенток репродуктивного возраста с острым сальпингоофоритом (абс., %,)

Показатель	Пациентки с острым сальпингоофоритом (n=33)		p
	1-я группа (n=18)	2-я группа (n=15)	
Нарушение менструального цикла	–	15 (100,0 %)	–
Обильные менструации	–	15 (100,0 %)	–
Продолжительность 7–8 дней	–	10 (66,7 %)	–
Менструальный цикл 30–35 дней	–	6 (40,0 %)	–
Менструальный цикл более 35 дней	–	7 (46,7 %)	–
Диспареуния	11 (61,1 %)	15 (100,0 %)	0,009
Эрозия шейки матки	5 (27,8 %)	11 (73,3 %)	0,015
Мастопатия фиброзно-кистозная	1 (5,5 %)	6 (40,0 %)	0,03
Рубец на матке	1 (5,5 %)	6 (40,0 %)	0,03
Хронический синусит	4 (22,2 %)	10 (66,7 %)	0,03
Миопия	4 (22,2 %)	9 (60,0 %)	0,06
Остеохондроз	(11,1 %)	12 (80,0 %)	0,02
СФДВНС	2 (11,1 %)	15 (100,0 %)	0,001

Примечание: p — статистические значимое различие между группами, СФДВНС — соматоформная дисфункция вегетативной нервной системы.

те (MCH, p=0,04), объема эритроцита (MCV, p=0,01) ширина распределения эритроцитов (RDW %, p=0,01) ширина распределения тромбоцитов (PDW, p=0,05) были статистически значимо ниже. Во 2-й группе количество лейкоцитов (абс., p=0,0005) было меньше, при этом число нейтрофилов сегментоядерных (с/я Н, соответственно абс., %, p=0,0001, p=0,01) и палочкоядерных (п/я Н p=0,041) и число лимфоцитов (p=0,0001) было статистически значимо больше.

Исследование метаболизма железа показало, что у пациенток 2-й группы по отношению к пациенткам 1-й группы статистически значимо была снижена концентрация сывороточного железа (p=0,021) и ферритина (p=0,00).

У пациенток 1-й группы уровень общего белка (p=0,001) и С-реактивного белка (p=0,00018) был выше, чем во 2-й.

Женщины 2-й группы по отношению к 1-й более часто предъявляли жалобы: недомогание 15 (100,0 %) против 3 (16,7 %, p=0,001), головные боли 8 (53,3 %) против 2 (11,1 %, p=0,02) нарушение сна 9 (60,0 %) против 1 (5,6 %, p=0,001), головокружение 6 (40,0 %, p=0,01), раздражительность 9 (60,0 %) против 3 (16,7 %, p=0,01), бледность кожных покровов 5 (33,3 %) против 0 (0 %, p=0,01), изменение ногтей 9 (60,0 %) против 3 (16,7 %, p=0,01), выпаде-

Таблица 2.

Показатели клинического анализа крови у пациенток репродуктивного возраста с сальпингоофоритом (M±SD, %)

Показатель в системе СИ	Пациентки с острым сальпингоофоритом (n=33)		p
	1-я группа (n=18)	2-я группа (n=15)	
Гемоглобин	134,2±3,0	112,0±5,0	0,0006
Эритроциты	4,3±0,2	4,0±0,1	0,189
Гематокрит	39,1±2,6	32±0,9	0,015
MCH	30,6±0,6	27,7±1,2	0,039
MCV	90,5±3,8	79±0,7	0,006
RDW %	14,0±1,1	10,6±0,6	0,011
PDW	15,9±0,6	12,6±1,5	0,049
Лейкоциты	17,0±1,0	11,2±0,7	0,0005
Нейтрофилы с/я абс.	6,4±0,3	10,6±0,4	0,0001
Нейтрофилы с/я (%)	58,9±1,2	62,7±0,7	0,01
п/я Н %	7,9±0,8	10,8±1,1	0,041
Лимфоциты абс.	3,1±0,2	5,6±0,2	0,0001

Примечание: p — статистически значимое различие, между группами, MCH — содержание Нв в эритроците, MCV — объем эритроцита, RDW % — ширина распределения эритроцитов, PDW — ширина распределения тромбоцитов, с/я Н — сегментоядерные нейтрофилы, п/я Н — палочкоядерные нейтрофилы, %, абс. — абсолютное число.

Таблица 3.

Показатели метаболизма железа, общего белка и С-реактивного белка у пациенток репродуктивного возраста с сальпингоофоритом (M±SD)

Показатель в системе СИ	Пациентки с острым сальпингоофоритом (n=33)		p
	1-я группа (n=18)	2-я группа (n=15)	
Сывороточное железо	23,2±6,9	6,1±1,1	0,021
Ферритин	37,5±1,6	7,2±1,7	0,001
Общий белок	74,2±2,3	56,2±1,9	0,0001
С-реактивный белок	24,6±1,5	14,9±1,6	0,00018

ние волос 11 (73,3 %) против 4 (22,2 %, p=0,01), извращение вкуса 4 (26,7 %) против 0 (26,7 %, p=0,03).

Результаты клинического анализа крови, показателей обмена железа подтвердили наличие железодефицитной анемии (ЖДА) у пациенток 2-й группы. Наряду со снижением ферритина и сывороточного железа у пациенток 2-й группы определяется снижение общего белка, вероятно, связанное с усилением его потребления.

У пациенток рассчитали индекс Кердо и индекс Хильдебрандта. Вегетативный индекс Кердо в 1-й группе был равен 16,4±1,04 балла и соответствовал сдвигу вегетативной нервной системы (ВНС) в сторону симпатикотонии, во 2-й группе индекс Кердо составил 23,2±4,9 балла (p=0,001) и соответствовал преобладанию парасимпатикотонии. Индекс Хильдебрандта в 1-й группе был равен 5,4±0,4, что отражало дисбаланс ВНС и рассогласованность вегетативной регуляции кардиореспираторной системы, усиление симпатических влияний, интенсификации кровообращения. Во 2-й группе индекс Хильдебрандта был равен 3,7±0,3 (p=0,002), что свидетельствовало о более сбалансированной активности ВНС и отсутствии межсистемных нарушений.

Изучение кардиореспираторных индексов было проведено по показателям сердечно-сосудистой системы: ЧСС и АД и респираторной системы — ЧДД. Исследование показало, что тип саморегулирования кровообращения у женщин 1-й группы был сердечный, 2-й группы сердечно-сосудистый. Сердечный тип более неблагоприятный, регулируется симпатической нервной системой, этот тип регуляции кровообращения расположен к кратковременной адаптации к болезни, связан с большим расходом энергии и приводит к срыву адаптации при длительном течении заболевания. Сосудистый тип регуляции относится к экономичному типу регуляции кровообращения с хорошей адаптацией к болезни и ее затяжному течению.

Коэффициент экономичности кровообращения во 2-й группе пациенток был ниже нормальных референсных значений в отличие от 1-й группы (1907 против 4777, p=0,0001), что может быть подтверждением ухудшения работы сердечно-сосудистой системы.

Уровень физического развития был выше у женщин во 2-й группе-0,8±0,1 в сравнении с 1-й группой 0,4±0,1 (p=0,001). Адаптационный потенциал системы кровообращения в анализируемых подгруппах свидетельствовал о напряжении адаптации. В 1-й группе (2,8±0,2) определялись сниженные функциональные возможности, и прогнозировался срыв адаптационных механизмов, во 2-й группе (2,02±0,2, p=0,00) определялась удовлетворительная адаптационная способность с хорошими функциональными возможностями.

Индекс Робинсона у женщин 2-й группы составил 87,8±4,1 против 88,2±4,8 1-й группы, что доказывает среднее функциональное состояние сердца и сосудов.

В данном случае оценка физической работоспособности, определение градации здоровья, показателя адаптации сердечно-сосудистой системы в целом отражает устойчивость пациенток к состоянию острого воспалительного заболевания, что обеспечивает коронарный резерв, возможность коронарных сосудов увеличивать доставку крови к миокарду в ответ на повышение потребности его в кислороде.

В 1-й группе женщин с острыми ВЗОМТ наблюдается дисбаланс ВНС с преобладанием симпатикотонической регуляции и рассогласованность в деятельности кардиореспираторной системы, при этом с усилением симпатических влияний быстро интенсифицируется система кровообращения. Возникает сердечный тип, более неблагоприятный, который регулируется симпатической нервной системой, этот тип регуляции кровообращения расположен к кратковременной быстрой и более сильной адаптации к болезни, что связано с большим расходом энергии и срывом адаптационных механизмов при длительном течении заболевания. При этом у них определяются сниженные функциональные возможности и физическое развитие. У женщин 1-й группы преобладание симпатической ВНС приводит к повышению в крови катехоламинов, стимуляции сердечно-сосудистой системы и центральной нервной системы с увеличением кровотока в интенсивно работающих органах, повышением АД, ЧСС, объема циркулирующей крови, активацией транспорта O_2 и метаболизма, эффективности внешнего дыхания, приводящей к гипервентиляционному синдрому.

Во 2-й группе у женщин с острыми ВЗОМТ и обильной менструацией, сопутствующей ЖДА, преобладающей парасимпатической регуляцией, межсистемные связи не нарушены, при этом возникает сосудистый более экономичный тип регуляции кровообращения с хорошей адаптацией к болезни и ее затяжному течению с последующим постепенным ухудшением работы сердечно-сосудистой системы. Уровень физического развития у них выше, при этом определяется удовлетворительная адаптационная способность с хорошими функциональными возможностями.

Можно полагать, что длительное снижение Нв и эритроцитов у женщин с обильными менструациями регулярно приводит к уменьшению содержания кислорода в крови и организм запускает компенсаторные механизмы адаптации к такому состоянию, своего рода как кратковременную повторную экстренную тренировку при гипоксии и впоследствии такая адаптация становится долговременной, как устойчивое приспособление к гипоксемии и гипоксии.

Болезнь для пациента является стрессом (Селье Г.), известно, что при любой болезни изменяется гомеостаз, функции регулирующих систем и возникает различная адаптация к новому состоянию. В последних работах [14,15] представлена научная информация, что стресс может усиливать бактериальное воспаление через вытеснение железа из лактоферрина и трансферрина гормонами стресса и свободное железо становится доступным для метаболизма и роста бактерий. При таком условии может наблюдаться прогрессирование заболевания и сложности в назначении терапии.

Заключение

Проведенное исследование показало, что у женщин с острым сальпингоофоритом и обильной менструацией диагностируется ЖДА, которая подтверждается клиническим анализом крови и показателями метаболизма железа, жалобами анемического и сидеропенического характера. У пациенток отмечается дисбаланс ВНС и несбалансированность кардиореспираторной системы. В 1-й группе наблюдается быстрая адаптационная реакция к болезни с быстрым истощением резервов, признаками нарушения регуляции работы сердца, большим расходом кислорода и неблагоприятным прогнозом. Во 2-й группе отмечается более медленная адаптационная реакция, направленная на долговременную адаптацию к болезни с экономичной деятельностью сердечно-сосудистой системы и более благоприятным прогнозом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воспалительные заболевания органов малого таза: современные алгоритмы диагностики и лечения / А.З. Хашукоева, М.И. Агаева, З.А. Агаева [и др.] // Лечащий врач. — 2024. — Т. 27, № 5. — С. 12–17. — DOI 10.51793/OS.2024.27.5.002. — EDN DUDONT.
2. Клинические рекомендации. Воспалительные заболевания женских половых органов, 2024
3. Селихова М.С. Современный подход к терапии сальпингоофорита через призму новых клинических рекомендаций / М.С. Селихова, А.А. Смольянинов // РМЖ. Мать и дитя. — 2022. — Т. 5, № 1. — С. 35–40. — DOI 10.32364/2618–8430-2022-5-1-35–40. — EDN NDYJWV.
4. Бурова Н.А. Острые воспалительные заболевания органов малого таза. Этиология, патогенез, клиника, диагностика, лечение и профилактика рецидивов: специальность 14.01.01 «Акушерство и гинекология»: диссертация на соискание ученой степени доктора медицинских наук / Бурова Наталья Александровна. — Волгоград, 2020. — 295
5. Особенности ферротерапии у женщин с железодефицитной анемией и воспалительными заболеваниями органов малого таза / З.Б. Хаятова, Н.Б. Абдукадирова, А.В. Якимова [и др.] // РМЖ. Мать и дитя. — 2019. — Т. 2, № 2. — С. 108–112. — EDN DLMUNU.
6. https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/anaemia
7. Новые возможности восполнения железодефицита у пациенток с аномальными маточными кровотечениями / И.Н. Кононова, Ю.Э. Доброхотова, Е.Н. Карева [и др.] // Медицинский совет. — 2024. — Т. 18, № 4. — С. 56–63. — DOI 10.21518/ms2024-163. — EDN SNKUHP.
8. Стуклов Н.И. Дефицит железа у женщин репродуктивного возраста: современный взгляд на проблему. Частота встречаемости в московской популяции / Н.И. Стуклов, Е.В. Ших // Фармакология & Фармакотерапия. — 2022. — № 4. — С. 16–21. — DOI 10.46393/27132129_2022_4_16. — EDN VZNZQQ.
9. Быстрая оценка показателей сердечно-сосудистой системы с помощью кардиореспираторных индексов / Е.Н. Мокашева, Е.Н. Мокашева, И.В. Гребенникова [и др.] // Успехи современной биологии. — 2023. — Т. 143, № 2. — С. 144–150. — DOI 10.31857/S0042132423020072. — EDN KMGQMJ.
10. Функциональные отклонения вегетативной нервной системы у девочек с гинекологической патологией и их динамика под влиянием санаторно-курортного лечения / О.И. Гармаш, А.В. Курганова, В.П. Татаурова, О.Ф. Гаврилова // Вестник восстановительной медицины. — 2020. — № 4(98). — С. 14–19. — DOI 10.38025/2078-1962-2020-98-4-14-19. — EDN OVNGYE.
11. Психо-сомато-вегетативные взаимоотношения / О.Г. Сафоничева, М.С. Троицкий, О.А. Митюшкина, Е. В. Дронова // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. — 2015. — № 1. — С. 3–9. — DOI 10.12737/10420. — EDN TMEJPZ.
12. Линева О.И., Муравец Е.Н. Коррекция психовегетативной составляющей синдрома хронических тазовых болей у женщин с использованием грандаксина // Проблемы репродукции. — 2007. — № 2. — С. 77–80
13. Быстрая оценка показателей сердечно-сосудистой системы с помощью кардиореспираторных индексов / Е.Н. Мокашева, Е.Н. Мокашева, И.В. Гребенникова [и др.] // Успехи современной биологии. — 2023. — Т. 143, № 2. — С. 144–150. — DOI 10.31857/S0042132423020072. — EDN KMGQMJ.
14. Метаболизм железа в условиях инфекции. Обзор литературы / Ю.П. Орлов, Н.В. Говорова, В.Н. Лукач [и др.] // Вестник интенсивной терапии имени А.И. Салтанова. — 2020. — № 1. — С. 90–99. — DOI 10.21320/1818-474X-2020-1-90-99. — EDN IVBHPX.
15. Железосвязывающая способность лактоферрина при воспалении / М.С. Терехова, И.В. Горудко, Д.В. Григорьева [и др.] // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. — 2018. — № 7(117). — С. 80–84. — EDN VSVRIX.

© Лещева Мария Юрьевна (mleshcheva@vrngmu.com); Коротких Ирина Николаевна (korotkih_1950@mail.ru);
Коричкина Любовь Никитична (lnkor@yandex.ru); Поселюгина Ольга Борисовна (poselubina@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.25

ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ И БИОМАРКЕРЫ НЕЙРОВОСПАЛЕНИЯ В ПОСТКОВИДНОМ СИНДРОМЕ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ). ЧАСТЬ II

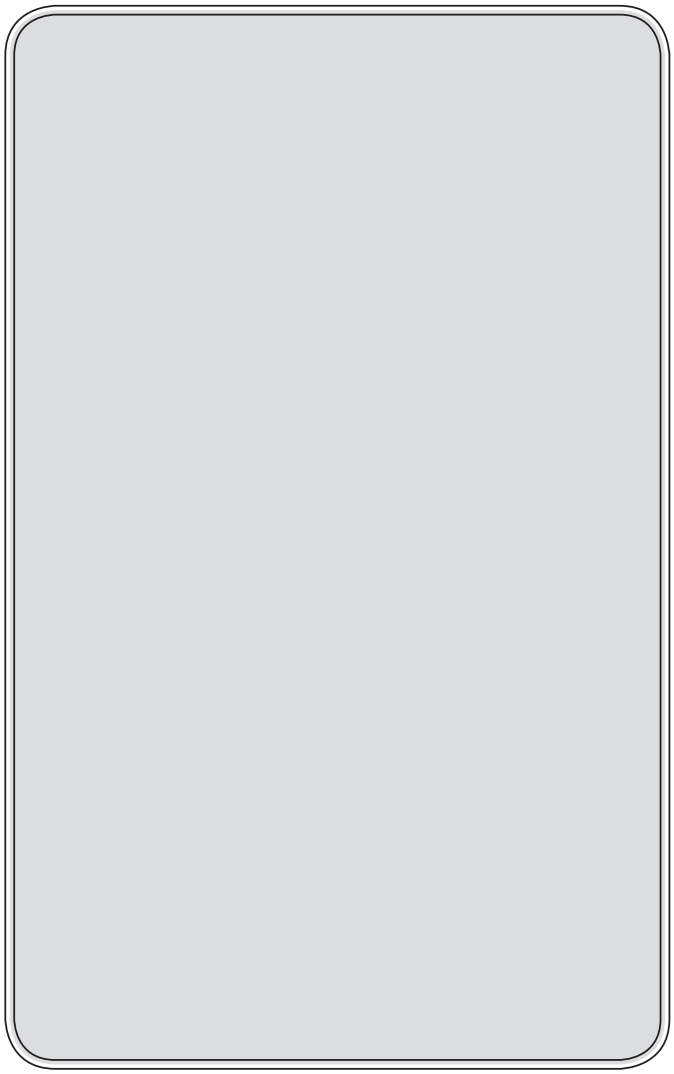
DEVELOPMENTAL FACTORS AND BIOMARKERS OF NEUROINFLAMMATION IN POSTCOVOID SYNDROME (LITERATURE REVIEW). PART II

Nikiforov I.
Chernobrovkina T.
Kostyuk G.
Kondratyuk M.
Burygina L.
Belova M.
Kardashian R.
Igumnov S.
Istomina V.
Kochina A.

Summary. Neuroinflammation is a complex pathophysiological process underlying a wide range of neurological and neurodegenerative diseases such as Alzheimer's disease, Parkinson's disease, multiple sclerosis, the effects of ischemic stroke, and kidney syndrome. This article examines the current understanding of the molecular and cellular mechanisms that initiate and support neuroinflammation. Special attention is paid to the role of glionic resident cells (microglia and astrocytes) as central regulators of the immune response and the central nervous system. Key signaling pathways, proinflammatory cytokines, and chemokines mediating communication between immune and neuronal cells are described. The dual role of neuroinflammation is analyzed: protection at the early stages of damage and destructive during chronic activation. Understanding these mechanisms is clinically important for developing new therapeutic strategies.

Keywords: neuroinflammation, microglia, astroglia, microbiota, blood-brain barrier, mast cells, cytokines, chemokines.

Никифоров Игорь Анатольевич
доктор медицинских наук, профессор, ФГБУ Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий Федерального медико-биологического агентства России, г. Москва
narkolog.ipk@mail.ru
Чернобровкина Тамара Васильевна
доктор медицинских наук, профессор, 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 г. Москва; Психиатрическая клиническая больница № 1 им. Н.А. Алексеева, г. Москва
pkb1@zdrav.mos.ru
Кондратюк Марина Геннадьевна
кандидат медицинских наук, доцент, ФГБУ Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий Федерального медико-биологического агентства России, г. Москва
narkolog.ipk@mail.ru
Бурыгина Лариса Андреевна
кандидат медицинских наук, главный врач, ГБУЗ г. Москва; Психиатрическая клиническая больница № 4 им. П.Б. Ганнушкина, г. Москва
pkb4@zdrav.mos.ru
Белова Майя Юрьевна
врач-психиатр, заведующий филиалом, Психиатрический стационар им. В.А. Гиляровского ГБУЗ г. Москва; Психиатрическая клиническая больница № 4 им. П.Б. Ганнушкина, г. Москва
pkb4-pb3@zdrav.mos.ru
Кардашян Руслан Антраникович
доктор медицинских наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва
rakar_26@mail.ru
Игумнов Сергей Александрович
доктор медицинских наук, профессор Российского национального исследовательского медицинского университета им. Н.И. Пирогова, г. Москва
igumnov_sa@rsmu.ru



Истомина Виктория Витальевна
кандидат медицинских наук, врач-психиатр, заведующий общепсихиатрическим отделением № 19, Психиатрического стационара им. В.А. Гиляровского филиал, Государственного бюджетного учреждения здравоохранения, г. Москва; Психиатрическая клиническая больница № 4 им. П.Б. Ганнушкина г. Москва
pkb4-pb3@zdrav.mos.ru
Кочина Анастасия Олеговна
Ординатор, ФГБУ Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий Федерального медико-биологического агентства России, г. Москва
narkolog.ipk@mail.ru

Аннотация. Нейровоспаление представляет собой сложный патофизиологический процесс, лежащий в основе широкого спектра неврологических и нейродегенеративных заболеваний, таких как болезнь Альцгеймера, Паркинсона, рассеянный склероз, последствия ишемического инсульта, постковидный синдром. В данной статье рассматриваются современные представления о молекулярных и клеточных механизмах, инициирующих и поддерживающих нейровоспаление. Особое внимание уделяется роли резидентных глиальнах клеток (микроглии и астроцитов) в качестве центральных регуляторов иммунного ответа и ЦНС. Описаны ключевые сигнальные пути, провоспалительные цитокины и хемокины, опосредующие коммуникацию между иммунными и нейрональными клетками. Анализируются дуальная роль нейровоспаления — защита на ранних этапах повреждения и деструктивная при хронической активации. Понимание этих механизмов клинически важно для разработки новых терапевтических стратегий.

Ключевые слова: нейровоспаление, микроглия, астроглия, микробиота, гематоэнцефалический барьер, тучные клетки, цитокины хемокины.

Молекулярные и клеточные механизмы нейровоспаления

По мнению многих авторов основные механизмы нейровоспаления выглядят следующим образом:

1. прямое цитопатическое действие вируса [1].
2. повышение уровня тканевого ангиотензина 2 (вызывает нейрональную и эндокринную дисфункции) [2,3].

Истощение АПФ2, вызванное SARS-Cov-2 нарушает работу ренин-ангиотензин-альдостероновой системы (РАС) мозга, трансформируя баланс рецептора ангиотензина (1–7) MAS в сторону нейровоспаления.

Дисрегуляция данного пути уменьшает уровень антиоксидантных и противоспалительных медиаторов в мозге [4], приводит к гипоперфузии, вазоконстрикции и эндотелиальной дисфункции, а также к повреждению сосудов из-за воспаления и чрезмерной продукции окислительных радикалов [5].

3. Накопление ангиотензина 2 в инфицированном мозге способствует увеличению VEGF (сосудистый эндотелиальный фактор роста) и высвобождению воспалительных цитокинов [6, 7].
4. Повышение уровня активированных белков комплемента в повреждённых тканях мозга способствует усилению воспалительной реакции и ухудшению неврологических последствий [8].
5. Ответ врождённого иммунитета играет решающую роль как в повреждении нервной ткани, так и в последующей активации адаптивного иммунитета [9].
6. Интенсивное производство медиаторов воспаления и изменение перфузии мозга приводит к увеличению проницаемости ГЭБ, активации микроглии и астроцитов, вызывая дисбаланс нейротрансмиттеров [10].

7. Цитокиновый шторм — основная причина полиорганной недостаточности, ОРДС, внутрисосудистой коагуляции и смертности [11,12].

Участники процесса нейровоспаления

Микроглия

Клетки микроглии являются резидентными макрофагами ЦНС. Это гетерогенная популяция клеток, которая выполняет множество физиологических функций в ЦНС:

- обеспечение метаболического и энергетического баланса нейронов;
- иммунный контроль нервной ткани;
- фагоцитоз апоптических клеток и продуктов нейрональной дегенерации;
- регуляция нейрональной пластичности;
- взаимодействие с периферической иммунной системой [4, 13];
- модификация синаптических структур, устранение излишних синапсов;
- ремоделирование нейронных сетей [14];
- участие в реакциях врождённого иммунитета [12, 15, 16] (высвобождение провоспалительных молекул, активных форм кислорода, мобилизация клеток периферической иммунной системы, активация астроцитов);
- экспрессия цитокинов (IL-6, интерфероны, IL-10);
- формирование провоспалительного и противовоспалительного фенотипов [14, 15];
- повреждение нейронов в условиях провоспалительного фенотипа;
- индукция симптомов нейропсихиатрических и нейродегенеративных заболеваний, опосредованных провоспалительным фенотипом [4, 17];
- способность к сверхактивации и гибели нейронов, опосредованной активацией астроцитов и Т-лимфоцитов [18];
- способность к истощению (что приводит к усилению неврологических проявлений — демиелинизации) [16].

В поврежденном мозге микроглия находится в состоянии М2 клеток (разветвлённые клетки), осуществляющих функцию нейропротекции. Любая альтерация вызывает трансформацию в макрофагальную М1 форму (амебоидные клетки), реализующие процесс нейровоспаления. Изменение фенотипа М1/М2 является взаимообратимым процессом, но может смещаться в пользу преобладания одной из форм.

Трансформация М2>М1 запускается и управляется нейронами, она вызывается IFNα и TFN-α, а фенотип М2 — интерлейкинами IL-4, IL-13, IL-25. При этом М1 форма получает способность активно перемещаться в межнейрональных пространствах [14].

Астроциты

Астроциты — это нейроглиальные клетки звездчатой формы с многочисленными отростками, сложные гетерогенные клетки, которые выполняют целый ряд функций:

- поддержание гомеостаза ЦНС;
- структурная и метаболическая поддержка нейронов;
- модуляция синаптогенеза и синаптической передачи;
- ремоделирование синапсов;
- участие в иммунном ответе;
- регулирование кровотока;
- контакт с сосудистой сетью, помощь в формировании и функционировании ГЭБ [19];
- поддержка ГЭБ [12, 15, 20];
- контроль высвобождения и поглощения нейротрансмиттеров;
- производство трофических факторов;
- поддержка функционирования глимфатической системы [21];
- источник ангиотензиногенеза (экспрессия рецептора ангиотензина 1 и MAS-рецептора) [15, 22];
- синтез биомаркеров повреждения ЦНС (GFAP, NiL) [12];
- участие в программе экспрессии провоспалительных генов с трансформацией астроцитов в провоспалительные, воспалительные и пронейродегенеративные клетки (фенотип А1) [15].

Реактивный астроглиоз — реакция на повреждение, направленная на выживаемость нейронов, восстановление целостности ГЭБ и изоляцию поврежденной области [4].

Активация астроцитов зависит от активации микроглии, которая выделяет IL-1, TFN-α и компонент комплимента 1g (C1g), последние помимо активации астроцитов способствуют выделению нейротоксина, который помогает апоптозу олигодендроцитов и зрелых нейронов, опосредованному каспазой 2/3.

Активация астроцитов происходит при участии инфламмасоны NLR3, присутствующей в микроглии.

Другой механизм активации астроцитов микроглией: фактор стромальных клеток (SDF-1α) взаимодействует с рецептором хемокина CXCCR4 и активирует его. Это способствует увеличению выброса глутамата астроцитами, вызывая глутаматергическую эксайтотоксичность. Это приводит к набуханию нейронов за счет притока Ca^{2+} и Na^{+}. Активируются ферменты (фосфолипаза А2, циклооксигеназа 2, липооксигеназы) участвующие в синтезе арахидоновой кислоты и ее превращении в простагландины, лейкотриены и тромбоксаны. При этом образуются АФК. [23].

Олигодендроциты

Олигодендроциты — клетки с множеством отростков, которые создают миелиновые оболочки для аксонов нейронов. Один олигодендроцит обслуживает до 50 аксонов.

Функции:
- трофическая поддержка аксонов;
- высвобождение лактата через транспорт монокарбоксилата 1, что используется аксонами для генерации АТФ;
- реакция на факторы, регулирующие пролиферацию, миграцию, дифференцировку, выживаемость;
- экспрессия и реакция на спектр рецептор-лигандных пар, включая глутаминовую кислоту, γ-аминомаслянную кислоту, АТФ, серотонин, ацетилхолин оксид азота, опиоиды, простагландины, пролактин, эндогенные каннабиноиды и ядерные рецепторы;
- участие в нейропротекции [24, 25].

Периферическая иммунная система

Иммунная система состоит из врожденной и адаптивной систем.

Врожденная иммунная система: миелоидные клетки, макрофаги, моноциты, дендритные клетки, лимфоидные клетки, естественные киллеры (NK-клетки).

Она действует как первая линия защиты, быстро воздействуя на патогены.

Адаптивная иммунная система: Т- и В-лимфоциты. Они действуют медленнее т.к. для выполнения функций им требуется предварительная активация и дифференцировка.

В-клетки размножаются и дифференцируются в плазматические клетки, которые вырабатывают специфические антитела.

Т-клетки дифференцируются в: цитотоксические, хелперные и регуляторные клетки.

Цитотоксические Т-клетки ($CD8^+$) уничтожают инфицированные клетки.

Т-хелперы (Th) регулируют активность других иммунных клеток.

Т-регуляторные клетки (Treg) подавляют активность других лимфоцитов, предотвращая аутоиммунные реакции.

Эти клетки проникают в ЦНС через фенестры в ГЭБ или через перивентрикулярные сенсорные органы, расположенные в стенках третьего и четвертого желудочков.

Длительная активация периферической иммунной системы может вызвать нейровоспалительный процесс, дисфункцию гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой системы, что приводит к патофизиологическим изменениям [23].

Микробиота кишечника

Она состоит из множества микроорганизмов, включая бактерии, археи, простейшие, грибы, водоросли, которые играют важную роль в физиологии кишечника и гомеостазе. Связь между кишечником и мозгом осуществляется через вегетативную нервную систему, кишечную нервную, нейроэндокринную и иммунную системы и включают в себя метаболиты, химические молекулы и нейронные пути.

Бактерии могут: ферментировать неперевариваемые пищевые волокна, вырабатывать короткоцепочные жирные кислоты (SCFA) (ацетат, пропионат, бутират), которые помогают поддерживать целостность кишечного барьера, выработку слизи и контролировать воспаление.

Короткоцепочные жирные кислоты (SCFA) могут попадать в кровоток, проникать через ГЭБ, и достигать мозга, где оказывают противовоспалительное и пронейрогенное действие, модулировать системы нейромедиаторов в т.ч. глутаматергическую, ГАМк-ергическую, серотонинергическую, дофаминергическую, адренергическую, норадренергическую системы и поддерживать целостность ГЭБ.

Микробиота кишечника также способна вырабатывать разные нейромедиаторы (ГАМК, серотонин, дофамин, норадреналин), и полиамины, которые могут действовать как на периферии, так и в ГМ.

Функции микробиоты: регуляция врожденных и адаптивных иммунных реакций на уровне слизистых оболочек, запуск и активация иммунных медиаторов, регуляция системного воспаления, препятствие проникновению комменсальных бактерий и провоспалительных молекул через кишечный барьер в кровоток и мозг.

Нарушение гомеостаза микробиоты кишечника могут привести к:
- дисбактериозу кишечника;
- периферическому воспалению;
- нейровоспалению;
- снижению целостности ГЭБ;

- гибели нейронов;
- дисфункции микроглии;
- симптомам депрессии [23].

Причинами нарушения кишечного барьера могут быть: стресс, иммунные факторы (цитокины), дисбактериоз, хроническое воспаление кишечника (провоспалительные цитокины, метаболические бактериальные компоненты, иммуноглобулины попадают из кишечника в кровь, нарушают целостность ГЭБ, проникают в мозг, вызывают нейровоспаление). [23].

Микробиота кишечника играет фундаментальную роль в поддержании гомеостаза и контроле как периферических, так и центральных иммунных реакций и может служить терапевтической мишенью для лечения психических расстройств.

Гематоэнцефалический барьер

Это полупроницаемый барьер между кровью и нервной тканью, который регулирует транспорт веществ между системой кровообращения и ЦНС.

Эндотелий ГЭБ секретирует биологически активные вещества, способствуя нормальной физиологической циркуляции крови. Существуют постоянная и стимулированная секреция. К стимулирующим факторам относятся изменение скорости крови, гипоксия, нейрогормоны и медиаторы (катехоламины, вазопрессин, ацетилхолин, брадикинин, гистамин и др.), тромбоцитарные факторы. Повышенные уровни цитокинов (IL-1β, IL-8, TNFα и др.), холестерина, гомоцистеина и антитела к фосфолипидам в крови оцениваются как факторы риска повреждения эндотелия. В нормальных физиологических условиях эндотелий поддерживает баланс между факторами, влияющими на тонус сосудов, гомеостаз, воспаление, рост и пролиферацию клеток. Патологические состояния, такие как гипоксия, интенсивное ПОЛ, нарушение кровотока, гипергомоцистеимия нарушают баланс между этими факторами. [26].

Нарушение целостности ГЭБ влечет за собой: повышение проницаемости ГЭБ, усиление транскрипции молекул адгезии в эндотелиальных клетках микрососудов ГМ (VCAM-1).

Нарушают целостность ГЭБ также другие участники нейровоспаления: IL-6, CXCL 10, CCL-2 (хемокиновый лиганд), CCR7 и CCR8 (хемокиновые рецепторы), привлекающие дендритные и периферические иммунные клетки, маркеры эндотелиальной дисфункции (молекула межклеточной адгезии-1, Е-селектин, фактор фон Виллебранда) [23].

Открыты два возможных механизма распространения SARS-Cov-2 через ГЭБ.

Первый — прямое инфицирование эндотелиальных клеток церебральных сосудов при взаимодействии их с АПФ2 рецепторами. Предполагается разрыв ГЭБ с последующим распространением SARS-Cov-2 по эндотелию капилляров и проникновением в мозг. [27,28].

Аутопсийное исследование установило наличие вирусных частиц SARS-Cov-2 в эндотелии капилляров и нейронах лобной доли. Нейроны содержат вирусные частицы, упакованные в расширенные везикулы [29].

Второй — через инфицирование лейкоцитов, проходящих через ГЭБ между эндотелиальными клетками (механизм «троянского коня», когда инфицированные иммунные клетки проходят из крови через ГЭБ и заражают ЦНС [30].

SARS-Cov-2 инфицирует лимфоциты, гранулоциты и моноциты, экспрессируя АПФ2 [31].

Дефектный ГЭБ может способствовать:
- проникновению SARS-Cov-2 в мозг;
- инфильтрации ЦНС иммунными клетками;
- патологической активации нейронов, эндотелиоцитов, глиальных клеток;
- острым и хроническим нейровоспалительным реакциям [32].
- патологическому перекрестному взаимодействию между врожденным и периферическим адаптивным иммунитетом мозга, что оказывает негативное влияние на нейротрасмиссию и вызывает глутамат-опосредованную нейрональную эксайтотоксичность;
- нарушению eNOS-зависимой вазодилатации, потери эндотелиальной динамической ауторегуляции, что приводит к снижению центральной перфузии [15, 33].

Тучные клетки

Они происходят от гемопоэтических стволовых клеток костного мозга и находятся во всех органах. В их цитоплазме находится большое число секреторных гранул. Последние содержат более 200 различных биологически активных веществ включая:
- биогенные амины (гистамин, катехоламины, полиамины);
- протеазы (триптаза, химаза, и др.);
- ферменты (катепсины, β-3-гексозаминидаза, β-глюкуронидаза, гепариназа, пероксидаза и др.);
- цитокины (интерлейкины IL-1β, IL-2, IL-4, IL-6, IL-10, IL-12, IL-13, IL-15, IL-16, фактор некроза опухолей — α и др.);
- факторы роста (фактор роста нервов, фактор стволовых клеток, васкулярный эндотелиальный фактор роста);

- протеогликаны (серглицин);
- мукополисахариды (гепарин, хондроитин-сульфат);
- пептиды и гормоны (вазоактиный интерстициальный пептид, вещество Р, эндорфин, антимикробный пептид кателицидин LL-37, сосудосуживающий пептид эндотелин-1).

Медиаторы клеток разделяют по содержанию на: постоянно хранящиеся, вновь синтезируемые при активации мастоцитов.

По функциональной направленности их делят на: провоспалительные цитокины (IL-1, IL-2, IL-6, FNOα), противовоспалительные цитокины (IL-4, IL-10, IL-13), что позволяет тучным клеткам инициировать и контролировать нейровоспаление [34].

Тучные клетки как части врожденного иммунитета принимают участие в адаптивных иммунных реакциях.

Они участвуют в: вирусных инфекциях, системных воспалительных заболеваниях, бронхиальной астме, нейровоспалительных заболеваниях, черепно-мозговой травме, инсульте, стрессовых расстройствах, первой линии защиты от проникающих в организм инфекционных агентов [15, 32].

Тучные клетки в ответ на активацию вирусной инфекции выделяют: протеазы (триптаза), гистамин, провоспалительные цитокины и хемокины (IL-1β, CCL2, IL-6, GM-CSF, TNF-α), (обостряют аллергические, астматические и воспалительные реакции) [15, 32, 35].

Цитокины

Цитокины — небольшие сигнальные белки, которые играют ключевую роль в межклеточной коммуникации, особенно в иммунной системе. Они секретируются различными клетками, включая иммунные (макрофаги, лимфоциты), эндотелиальные клетки. Цитокины регулируют воспалительные и иммунные реакции, влияют на рост, дифференцировку и активацию клеток.

В зависимости от клеток, которые их производят, цитокины можно разделить на несколько типов:

- лимфокины — вырабатываются лимфоцитами (интерлейкины, интерфероны);
- монокины — продуцируются моноцитами и макрофагами (ФНО-α, ИЛ-1);
- колониестимулирующий фактор (CSF) — регулирующий гемопоэз (G-CSF, GM-CSF).

По своим функциям цитокины можно разделить на группы:

- воспалительные — усиливают воспаление (IL-1, IL -6, FNO-α);
- противовоспалительные — подавляют воспаление (IL -10, NGF-β);
- регуляторы иммунного ответа — модулируют активность иммунных клеток (IL-2, IL-4);
- факторы роста — стимулируют пролиферацию и дифференцировку клеток (EGF, VEGF).

Чрезмерная, неконтролируемая активация иммунных клеток, приводящая к массовому выбросу провоспалительных цитокинов (цитокиновый шторм), вызывает системное воспаление, повреждение тканей и приводит к полиорганной недостаточности.

Динамическое наблюдение за уровнем цитокинов позволяет:

- оценить тяжесть воспалительного процесса (например, при Covid-19 или сепсисе);
- прогнозировать течение болезни — высокие уровни IL -6 и FNO -α, часто коррелируют с неблагоприятным исходом;
- контролировать эффективность терапии (например, при лечении аутоимунных заболеваний или иммунотерапии рака);
- диагностировать иммунопатологию и аутоиммунные заболевания [moleculab.ru, ru.wikipedia.org].

В качестве биомаркеров используются провоспалительные цитокины: амфотерин (High-Mobility Group Protein B1, HMGB1), IL-1β, IL-6, IL-8, IL-33, CCL-2, TNF-α, фактор торможения миграции макрофагов (Macrophage migration inhibitory factor, MIF), и противовоспалительный IL-10. При нейровоспалении также может повышаться уровень трансформирующего фактора роста-β (Transforming growth factor beta, TGF-β), увеличение концентрации которого связано с поступлением фибриногена в нервную ткань из-за нарушения целостности ГЭБ.

HMGB1 — секретируется активированными макрофагами и моноцитами как цитокиновый медиатор, высвобождается при некрозе клеток и тканей. Связывается с рецепторами врожденного иммунитета TLR4, что приводит к секреции цитокинов макрофагами и последующей воспалительной реакции.

Высокие показатели HMGB1 в спинномозговой жидкости связаны с неблагоприятным исходом после повреждения мозга, а его пиковые уровни обратно коррелируют с показателями по шкале исходов Глазго через 6 месяцев после повреждения мозга. HMGB1 также активируется экзогенными молекулами, в частности липополисахаридом, который является компонентом клеточной стенки грамотрицательных бактерий и мощным индуктором воспалительных каскадов.

HMGB1-зависимый путь ответственен за активацию каспазы-1 и сборку неканонических инфламмасом вследствие чего развивается пироптоз.

IL-33 относиться к семейству IL-1 и активно стимулирует выработку Т-хелперов 2 типа (Th 2) — ассоциированных цитокинов (IL-4). IL-33 является лигандом для ST2, рецептора семейства IL-1, который активно экспрессируется на Th2-клетках, тучных клетках и врожденных лимфоцитах 2-й группы.

IL-33 вырабатывается различными типами клеток, включая фибробласты, тучные, дендритные, макрофаги, остеобласты, эндотелиальные и эпителиальные клетки.

IL-33, выделяемый поврежденными тканями во время вирусной инфекции, напрямую стимулирует цитотоксические CD8+ Т-клетки для эффективного формирования реакции «запоминания» и противовирусного иммунитета.

IL-33, секретируемый нейроглией, представляет собой потенциальный маркер нейровоспаления и служит эндогенным сигналом о повреждении ткани. Его роль заключается в активации микроглии и макрофагов и стимуляции высвобождении хемокинов. При повреждении мозга в ближайшие 3 часа происходит повышение уровня IL-33 наряду с другими цитокинами: IL-1β, IL-38, TNF-α, интерферона альфа (IFN-α) и IL-19.

Доказана зависимость между повышением уровня IL-1β, IL-6 в сыворотке крови и ликворе и выраженностью отека мозга, ухудшением состояния пациентов в остром периоде повреждения мозга и неблагоприятным неврологическим исходом через 6 месяцев после травмы.

Концентрация провоспалительных цитокинов TNF-α, IL-8, интерферона гамма (IFN-γ) в сыворотке крови значимо увеличивается при тяжелом повреждении мозга, как и уровень противовоспалительных цитокинов (IL-10), однако соотношение этих веществ может меняться в зависимости от прошедшего после повреждения времени.

Использование цитокинов в качестве биомаркеров целесообразно, поскольку они являются динамичным показателем: период полувыведения цитокинов из системного кровотока составляет несколько минут. Цитокины обладают плейотропностью, существует большое количество их дублирующих и антагонизирующих цепей. Концентрация цитокинов может повышаться при периферическом воспалении, не затрагивающем нервную ткань, поскольку источником этих веществ являются не только клетки глии, но и клетки иммунной системы. При диагностике следует анализировать уровень в биологических жидкостях не одного конкретного цитокина, а сразу нескольких — провоспалительных и противовоспалительных.

По результатам анализа данных литературы можно резюмировать следующее: увеличение концентраций IL-6, снижение концентрации IL-2, увеличение концентрации IFN-γ, TNF-α как в головном мозге, так и в плазме крови ассоциируется с формированием хронического вялотекущего нейровоспаления.

Изменение концентрации обозначенных цитокинов может быть индуцировано несколькими путями:

- полиморфизмом промоторных областей генов IL-6, TWFa, что увеличивает трансляцию этих цитокинов и их концентрацию в ГМ выше уровня физиологического регулирования;
- изменение активности индоламин-2, 3 диоксигеназы с истощением количества триптофана и, соответственно, серотонина, увеличения наработки кинуренина и хинолиновой кислоты, что ведет к гиперактивации NMDA-рецепторов, запуску процесса эксайтотоксичности и острого и хронического нейровоспаления;
- нарушение экспрессии белка-коннексина Cx43 в сочетании со сниженной экспрессией нейротрофического фактора мозга, что нарушает деятельность глутаматных нейронов с увеличением высвобождения АТФ и глутамата, непосредственно вызывающего гибель нейронов;
- снижением плазменных концентраций холестерина, триглицеридов, липопротеинов высокой и низкой плотности, что индуцирует увеличение концентрации IL-6 и запускает нейровоспаление;
- низкие уровни экспрессии ряда хемокинов CCL1, CCL8, CCL13, CCL15, CCL17, CCL19, CCL20, CXCL11 и IL-6;
- гиперэкспрессией ряда генов, вовлеченных в процессы активации транскрипции белков иммунной системы и метаболической активности сателлитных клеток предшественников нейронов — JUN, FOS, ATF3, MYC, EGR1, FOSB, DUSP1, NF KBIA, TLR2, NR4A1;
- поврежденным гематоэнцефалическим барьером, через который в ГМ начинают проникать периферические цитокины воспаления и другие патогены, инициирующие переход микроглиии в макрофагальную форму [14].

Хемокины

Это группа белков, привлекающих иммунные клетки в зону воспаления. Их делят на 4 класса (по положению остатков цистеина): C, CC, CXC, CX3C.

Хемокины включают:

- CCL2/MCP-1;
- CXCL12/SDF-1α;
- CX3CL1/фракталкин;
- CXCL10/IP10;
- CCL 3/MIP-1α
- CCL 5/RANTES.

Они оказывают свое действие через рецепторы на клетках микроглии, астроцитах и нейронах, связанных с G-белками [36, 37].

CCL 5 (RANTES) экспрессируется и секретируется нормальными Т-лимфоцитами, является селективным хемоаттрактором, вызывающим миграцию лейкоцитов в зону воспаления (эозинофилов, лимфоцитов, Т-клеток, NK-клеток, базофилов), а также тучных клеток [38].

Он стимулирует Т-клетки, приводя к высвобождению ими провоспалительных цитокинов IL-2 и IFN-γ и апоптозу [39].

В части III настоящего обзора литературы мы проанализируем роль в нейровоспалительных процессах нейроспецифических белков: S100β, нейроспецифической енолазы (NSE), глиального фибриллярного белка (GFAP), основного миелинового белка (MBP), убиквитин карбокси-концевой енолазы (UCHL 1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Kumar A., Pareek V., Prasoon P., Faiq M.A., Kumar P., Kumari C., Narayan R.K. Possible routes of SARS-CoV-2 invasion in brain: In context of neurological symptoms in COVID-19 patients. J Neurosci Res. 2020 Dec; 98(12):2376–2383. doi: 10.1002/jnr.24717. Epub 2020 Aug 31. PMID: 32869376.
2. Fu Y., Cheng Y., Wu Y. Understanding SARS-CoV-2-Mediated Inflammatory Responses: From Mechanisms to Potential Therapeutic Tools. Virol Sin. 2020;35(3):266–271. doi:10.1007/s12250-020-00207-4.
3. Kai H., Kai M. Interactions of coronaviruses with ACE2, angiotensin II, and RAS inhibitors-lessons from available evidence and insights into COVID-19. Hypertens Res. 2020;43(7):648–654. doi:10.1038/s41440-020-0455-8.
4. Murta V., Villarreal A., Ramos A.J. Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 Impact on the Central Nervous System: Are Astrocytes and Microglia Main Players or Merely Bystanders? ASN Neuro. 2020; 12:1759091420954960. doi:10.1177/1759091420954960.
5. Kuba K., Imai Y., Rao S., et al. A crucial role of angiotensin converting enzyme 2 (ACE2) in SARS coronavirus-induced lung injury. Nat Med. 2005;11(8):875–879. doi:10.1038/nm1267.
6. Gheblawi M., Wang K., Viveiros A., et al. Angiotensin-Converting Enzyme 2: SARS-CoV-2 Receptor and Regulator of the Renin-Angiotensin System: Celebrating the 20th Anniversary of the Discovery of ACE2. Circ Res. 2020;126(10):1456–1474. doi:10.1161/CIRCRESAHA.120.317015.
7. Yin X.X., Zheng X.R., Peng W., Wu M.L., Mao X.Y. Vascular Endothelial Growth Factor (VEGF) as a Vital Target for Brain Inflammation during the COVID-19 Outbreak. ACS Chem Neurosci. 2020;11(12):1704–1705. doi:10.1021/acschemneuro.0c00294.
8. Mahmudpour M., Roozbeh J., Keshavarz M., Farrokhi S., Nabipour I. COVID-19 cytokine storm: The anger of inflammation. Cytokine. 2020; 133:155151. doi: 10.1016/j.cyto.2020.155151.
9. Cataldi M., Pignataro G., Taglialatela M. Neurobiology of coronaviruses: Potential relevance for COVID-19. Neurobiology of Disease. 2020; 143:105007. doi: 10.1016/j.nbd.2020.105007.
10. Tsuruta R., Oda Y.A clinical perspective of sepsis-associated delirium. J Intensive Care. 2016; 4:18. Published 2016 Mar 23. doi:10.1186/s40560-016-0145-4.
11. Azkur A.K., Akdis M., Azkur D., et al. Immune response to SARS-CoV-2 and mechanisms of immunopathological changes in COVID-19. Allergy. 2020;75(7):1564–1581. doi:10.1111/all.14364.
12. Vargas G., Medeiros Geraldo L.H., Gedeão Salomão N., Viana Paes M., Regina Souza Lima F., Carvalho Alcantara Gomes F. Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) and glial cells: Insights and perspectives. Brain, behavior, & immunity — health. 2020; 7:100127. doi: 10.1016/j.bbih.2020.100127.
13. Ewald A.C., Kiernan E.A., Roopra A.S., et al. Sex- and Region-Specific Differences in the Transcriptomes of Rat Microglia from the Brainstem and Cervical Spinal Cord. The Journal of pharmacology and experimental therapeutics. 2020;375(1):210–222. doi:10.1124/jpet.120.266171.
14. Козлов В.А., Голенков А.В., Зотов П.Б. Дискуссионные аспекты суицидологии: связь нейровоспаления с суицидальным поведением у лиц с психическими расстройствами. Сообщение II. Суицидология. 2024; 15 (2): 29-56. doi: 10.32878/suiciderus.24-15-02(55)-29-56
15. Алексеева Н.Т., Соколов Д.А., Никитюк Д.Б., Клочкова С.В., Кварацхелия А.Г. Молекулярные и клеточные механизмы повреждения центральной нервной системы при COVID-19. Журнал анатомии и гистопатологии. 2020;9(3):72–85. doi: 10.18499/2225–7357-2020-9-3-72–85.
16. Chatterjee D., Biswas K., Nag S., Ramachandra S.G., Das Sarma J. Microglia play a major role in direct viral-induced demyelination. Clinical and developmental immunology, 2013;2013:510396. doi: 10.1155/2013/510396.
17. Lavi E., Cong L. Type I astrocytes and microglia induce a cytokine response in an encephalitic murine coronavirus infection. Exp Mol Pathol. 2020 Aug; 115:104474. doi: 10.1016/j.yexmp.2020.104474.
18. Zimmermann J., Hafezi W., Dockhorn A., Lorentzen E.U., Krauthausen M., Getts D.R., Müller M., Kühn J.E., King N.J.C. Enhanced viral clearance and reduced leukocyte infiltration in experimental herpes encephalitis after intranasal infection of CXCR3-deficient mice. Journal of NeuroVirology. 2017 Jun;23(3):394–403. doi: 10.1007/s13365-016-0508-6. Epub 2017 Jan 23. PMID: 28116674.
19. da Silva S.M., Campos G.D., Gomes F.C.A., Stipursky J. Radial Glia-endothelial Cells' Bidirectional Interactions Control Vascular Maturation and Astrocyte Differentiation: Impact for Blood-brain Barrier Formation. Curr Neurovasc Res. 2019;16(4):291–300. doi:10.2174/1567202616666191014120156.
20. Diniz L.P., Matias I., Siqueira M., Stipursky J., Gomes FCA. Astrocytes and the TGF-β1 Pathway in the Healthy and Diseased Brain: a Double-Edged Sword. Mol Neurobiol. 2019;56(7):4653–4679. doi:10.1007/s12035-018-1396-y.
21. Plog B.A., Nedergaard M. The Glymphatic System in Central Nervous System Health and Disease: Past, Present, and Future. Annu Rev Pathol. 2018; 13:379–394. doi:10.1146/annurev-pathol-051217-111018.
22. Steardo L., Steardo L.Jr., Zorec R., Verkhratsky A. Neuroinfection may contribute to pathophysiology and clinical manifestations of COVID-19. Acta Physiol (Oxf). 2020;229(3): e13473. doi:10.1111/apha.13473.

23. Kouba B.R., de Araujo Borba L., Borges de Souza. P et al. Role of Inflammatory Mechanisms in Major Depressive Disorder: From Etiology to Potential Pharmacological Targets. Cells. 2024; 13(5):423. doi: 10.3390/cells13050423.
24. Skaper S.D., Facci L., Zusso M., Giusti P. An Inflammation-Centric View of Neurological Disease: Beyond the Neuron. Front Cell Neurosci. 2018; 12:72. Published 2018 Mar 21. doi:10.3389/fncel.2018.00072.
25. Нижегородова Д.Б., Левковская А.Н., Зафранская М.М. Иммунологические механизмы нейровоспаления и нейродегенерации //Иммунопатология, аллергология, инфектология. — 2018. — №. 4. — С. 27–42. doi: 10.14427/jipai.2018.4.27.
26. Takata F., Nakagawa S., Matsumoto J., Dohgu S. Blood-Brain Barrier Dysfunction Amplifies the Development of Neuroinflammation: Understanding of Cellular Events in Brain Microvascular Endothelial Cells for Prevention and Treatment of BBB Dysfunction. Front Cell Neurosci. 2021; 15:661838. Published 2021 Sep 13. doi:10.3389/fncel.2021.661838
27. Montalvan V., Lee J., Bueso T., De Toledo J., Rivas K. Neurological manifestations of COVID-19 and other coronavirus infections: A systematic review. Clin Neurol Neurosurg. 2020; 194:105921. doi: 10.1016/j.clineuro.2020.105921.
28. Sankowski R., Mader S., Valdés-Ferrer S.I. Systemic inflammation and the brain: novel roles of genetic, molecular, and environmental cues as drivers of neurodegeneration //Frontiers in cellular neuroscience2015;9:28. Published 2015 Feb 2. doi:10.3389/fncel.2015.00028.
29. Zubair A.S., McAlpine L.S., Gardin T., Farhadian S., Kuruvilla D.E., Spudich S. Neuropathogenesis and Neurologic Manifestations of the Coronaviruses in the Age of Coronavirus Disease 2019: A Review. JAMA Neurol. 2020;77(8):1018–1027. doi:10.1001/jamaneurol.2020.2065.
30. Berth S.H., Leopold P.L., Morfini G.N. Virus-induced neuronal dysfunction and degeneration. Front Biosci (Landmark Ed). 2009;14(14):5239–5259. Published 2009 Jun 1. doi:10.2741/3595.
31. Gu J., Gong E., Zhang B., et al. Multiple organ infection and the pathogenesis of SARS. J Exp Med. 2005;202(3):415–424. doi:10.1084/jem.20050828.
32. Kempuraj D., Selvakumar G.P., Ahmed M.E., et al. COVID-19, Mast Cells, Cytokine Storm, Psychological Stress, and Neuroinflammation. Neuroscientist. 2020;26(5-6):402–414. doi:10.1177/1073858420941476.
33. Najjar S., Najjar A., Chong D.J., et al. Central nervous system complications associated with SARS-CoV-2 infection: integrative concepts of pathophysiology and case reports. J Neuroinflammation. 2020;17(1):231. Published 2020 Aug 6. doi:10.1186/s12974-020-01896-0.
34. Григорьев И.П., Коржевский Д.Э. Тучные клетки и нейровоспаление в патогенезе нервных и психических заболеваний // Медицинский академический журнал. — 2021. — Т. 21. — №2. — С. 7–24. doi: 10.17816/MAJ63228.
35. Theoharides T.C., Alysandratos K.D., Angelidou A., et al. Mast cells and inflammation. Biochim Biophys Acta. 2012;1822(1):21–33. doi: 10.1016/j.bbadis.2010.12.014.
36. Rhodes J.K., Sharkey J., Andrews P.J. The temporal expression, cellular localization, and inhibition of the chemokines MIP-2 and MCP-1 after traumatic brain injury in the rat. J. Neurotrauma. 2009;26(4):507–525. doi:10.1089/neu.2008.0686.
37. Карчевская А.Е., Паюшина О.В., Шарова Е.В., Окнина Л.Б., Титов О.Ю. Нейровоспаление как процесс вторичного повреждения при черепно-мозговой травме. Анналы клинической и экспериментальной неврологии. 2023; 17(1): 55–68. DOI: doi: 10.54101/ACEN.2023.1.7.
38. Akamatsu Y., Hanafy K.A. Cell Death, and Recovery in Traumatic Brain Injury. Neurotherapeutics. 2020;17(2):446–456. doi:10.1007/s13311-020-00840-7.
39. Albert V., Subramanian A., Agrawal D., Bhoi S.K., Pallavi P., Mukhopadhayay AK. RANTES levels in peripheral blood, CSF, and contused brain tissue as a marker for outcome in traumatic brain injury (TBI) patients. BMC Res Notes. 2017;10(1):139. Published 2017 Mar 24. doi:10.1186/s13104-017-2459-2

© Никифоров Игорь Анатольевич (narkolog.ipk@mail.ru); Чернобровкина Тамара Васильевна (narkolog.ipk@mail.ru);
Костюк Георгий Петрович (pkb1@zdrav.mos.ru); Кондратюк Марина Геннадьевна (narkolog.ipk@mail.ru);
Бурыгина Лариса Андреевна (pkb4@zdrav.mos.ru); Белова Майя Юрьевна (pkb4-pb3@zdrav.mos.ru);
Кардашян Руслан Антраникович (rakar_26@mail.ru); Игумнов Сергей Александрович (igumnov_sa@rsmu.ru);
Истомина Виктория Витальевна (pkb4-pb3@zdrav.mos.ru); Кочина Анастасия Олеговна (narkolog.ipk@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.30

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИНТЕРВЕНЦИОННОГО ЛЕЧЕНИЯ АРТЕРИО-ВЕНОЗНЫХ МАЛЬФОРМАЦИЙ ЛЕГКИХ НА КАЧЕСТВО ЖИЗНИ ПАЦИЕНТОВ ИСПОЛЬЗУЯ СОВРЕМЕННЫЕ ШКАЛЫ-ОПРОСНИКИ

EVALUATION OF THE ENDOVASCULAR TREATMENT OF PULMONARY ARTERIOVENOUS MALFORMATIONS ON THE QUALITY OF PATIENT'S LIFE USING MODERN QUESTIONNAIRE SCALES

K. Petrosyan
Kh. Khakimov
G. Dadabaev

Summary. The aim of this study was to assess the effectiveness of using a highly specialized questionnaire scale (VSAQ) in addition to standard examination of patients with persistence of pulmonary arteriovenous malformations (PAVMs). From August 2012 to August 2019, at the A.N. Bakulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery of the Ministry of Health of the Russian Federation, 33 patients (20 men and 13 women) underwent embolization and closure of pathological PAVMs. In this study, along with general clinical examination of patients, the level of blood oxygenation before and after PAVM closure was evaluated, and a repeated assessment of the functional class of heart failure was conducted in the mid-to-long-term period after PAVM closure. To directly assess changes in quality of life, we used specialized questionnaire scales (VSAQ). The use of highly sensitive questionnaire scales is an important addition to general clinical examinations of patients with AML. Moreover, the two-factor nature of this method allows for the assessment of the effectiveness of the treatment carried out in the long term with minimal costs and in the shortest possible time.

Keywords: congenital heart defects, pulmonary arteriovenous malformations, scale-questionnaires.

Петросян Карен Валерьевич
доктор медицинских наук, врач, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева
dr.petrosian@gmail.com
Хакимов Хуршид Анварович
Врач, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева
khakimov.khurshid@bk.ru
Дадабаев Гуламжан Мураджанович
кандидат медицинских наук, врач, ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева
dgmed83_83@mail.ru

Аннотация. Целью данного исследования явилась оценка эффективности использования высокоспециализированной шкалы-опросника (VSAQ) в дополнении к стандартному обследованию пациентов с персистированием артерио-венозных мальформаций легких (АВМЛ). За период с августа 2012 по август 2019 гг. на базе ФГБУ НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева МЗ РФ у 33 больных (20 мужского пола и 13 женского) была выполнена эмболизация и закрытие патологических АВМЛ. В данном исследовании наряду с общеклиническим обследованием пациентов были оценены уровень оксигенации крови до закрытия АВМЛ и после, также производилась повторная оценка функционального класса СН в средне-отдаленном периоде после закрытия АВМЛ. Для непосредственной оценки изменения качества жизни нами были использованы специальные шкалы опросники (VSAQ).
Использование высокочувствительных шкал опросников является важным дополнением общеклинических обследований пациентов с АВМЛ, кроме того, двухфакторность данной методики позволяется оценить эффективность проведенного лечения в отдаленном периоде при минимальных затратах и в кратчайшие сроки.

Ключевые слова: врожденные пороки сердца, артерио-венозные мальформации легких, шкалы-опросники.

Введение

Распространенность врожденных пороков сердца (ВПС) в Российской Федерации продолжает увеличиваться, в частности с 2014 по 2017 гг. отмечается увеличение заболеваемости ВПС на 100 тыс. населения во всех возрастных группах с 0,6 % до 20,3 %, при этом отмечается снижение количества впервые выявленных случаев в более старших группах и увеличение таких случаев в возрасте до 14 лет на 2,9 %, что может свидетельствовать о более ранней и эффективной диагностике данной группы патологий [1,2].

Отдельно стоящей проблемой, рассмотренной в контексте текущего исследования, являются врожден-

ные артерио-венозные мальформации легких (АВМЛ), представляющие собой аномальное сообщение между артерией и веной при отсутствии какого-либо промежуточного капиллярного русла. Такие аномальные сосудистые свищи могут образовываться как в легочном, так и в системном кругах кровообращения [3]. При этом частота АВМЛ относительно невысока и составляет около 0,02 % в популяции [4]. Следует отметить, что данная патология, в 1,5–1,8 раз чаще встречается у женщин, что, по-видимому, обусловлено более частыми обменными заболеваниями, свойственными женскому полу [5,6,7]. Помимо общепринятых классификаций, АВМЛ в мировой литературе разделяют на врожденные (изолированные) и приобретенные. Независимо от формы и типа АВМЛ основным клиническим проявлением АВМЛ является выраженная гипоксия. Однако данное состояние без иных признаков, зачастую выявляется спорадически, во многом благодаря тому, что пациенты с АВМЛ сохраняют значительную толерантность к физическим нагрузкам даже при снижении насыщения кислородом крови до 92 % (Sa≤ 92 %) [8,9,10]. До последнего времени основным способом выявления данных пациентов являлось общеклиническое и инструментальное обследование с интерпретацией полученных данных. Однако данный подход не всегда отражает значимость и эффективность закрытия АВМЛ по отношению к качеству жизни вышеописанных пациентов. В ходе данного исследования стандартные этапы обследования пациентов с АВМЛ на дооперационном и послеоперационном этапе были дополнены использованием шкалы опросника. В ходе анализа современных шкал-опросников нами была выбрана шкала VSAQ (Veterans Specific Activity Questionnaire). Выбор именно данной шкалы был продиктован во многом благодаря ее высокой специфичности и чувствительности в контексте обследования пациентов с АВМЛ [11,12]. В отличие от объективных данных инструментального обследования и результатов общеклинических исследований, данная шкала направлена в первую очередь на субъективную оценку физической активности пациента. В оригинальной шкале представлены виды физической активности в порядке возрастания трудности их выполнения. В ходе прохождения опроса, от пациентов требовалось отметить тот уровень физической активности, при выполнении которого наблюдалась отдышка, дискомфорт в груди, требующие прекращения деятельности. Далее, полученные данные интерпретировали совместно с результатами общеклинических обследований и формировали план реабилитации [11]. Впоследствии данная шкала подвергалась различным модификациям. За основу нашей шкалы легла шкала, предложенная коллегией авторов под руководством Gawecki F, в 2019 году [12]. Наша модификация заключалась в адаптации зарубежной версии под физическую активность более привычную для пациентов с АВМЛ из РФ и стран СНГ. Таким образом, целью данного исследования явилась оценка изменения качества жизни пациентов с персистированием АВМЛ после интервенционного закрытия мальформаций с дополнением стандартных методов обследования высоко специфической шкалой опросником (VSAQ).

Материал и методы

За период с августа 2012 по август 2019 гг. на базе ФГБУ НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева МЗ РФ у 33 больных (20 мужского пола и 13 женского) была выполнена эмболизация и закрытие патологических АВМЛ. Возраст больных варьировал от 6 до 32 лет (в среднем 12,5+9,1). У 7 (21,2 %) пациентов развитие АВМЛ наблюдалось после выполнения гемодинамической коррекции сложных ВПС, у 4 (12,1 %) пациентов развитие АВМЛ отмечалось после ранее перенесенной травмы органов грудной клетки, у 3 (9,1 %) — на фоне системного васкулита и у оставшихся 19 (57,6 %) АВМЛ развились на фоне наследственной геморрагической телеангиоэктазии. Закрытие АВМЛ после операции Фонтена выполнялось у 6 (18,2 %), и у 1 (3,0 %) пациента — после операции Гленна. Суммарно у 33 пациентов было выявлено закрытие 39 артерио-венозных мальформаций легких.

У 19 (57,62 %) из 33 пациентов в анамнезе отмечалась наследственная геморрагическая телеангиоэктазия (НГТ), установленная в детском возрасте на основании профузных, персистирующих носовых кровотечений, а также по результатам генетического секвенирования и выявления специфических генетических маркеров.

В свою очередь, 7 (21,2 %) из 33 пациентов ранее подвергались паллиативной гемодинамической коррекции в рамках хирургического лечения сложных врожденных пороков сердца (таблица 1).

Таблица 1.

Сводные данные касательно ранее выполненных паллиативных вмешательства в рамках гемодинамической коррекции сложных ВПС

	Анастомоза Гленна	Операция Фонтена
Двухотточный правый желудочек (ДОС от ПЖ)	1	2
Атрезия трикуспидального клапана (АТК)	—	2
Синдром гипоплазии левых отделов сердца (СГЛОС)	—	1
Синдром гипоплазии правых отделов сердца (СГПОС)	—	1

Также, все 33 пациента, на момент госпитализации в ФГБУ НМИЦ ССХ им. А.Н. Бакулева МЗ РФ имели признаки хронической сердечной недостаточности (ХСН) [7]. Сводные данные касательно выраженности ХСН указаны в таблице 2.

Таблица 2.

Выраженность ХСН по шкале NYHA у 33 пациентов с подтвержденным наличием АВМЛ

	Функциональный класс СН по классификации NYHA				
	I	II		III	
		II a	II b	III a	III b
N пациентов	—	17	5	11	—

В ходе текущего исследования всем пациентам было проведено общеклиническое обследование. В контексте исследуемой проблемы были оценены уровень оксигенации крови до закрытия АВМЛ и после, также производилась повторная оценка функционального класса СН в средне-отдаленном периоде после закрытия АВМЛ. Для непосредственной оценки изменения качества жизни нами были использованы специальные адаптированные шкалы-опросники (VSAQ). Пример данной шкалы-опросника представлен в таблице 3.

Результаты

Интервенционная процедура закрытия АВМЛ выполнялась по двум методикам: закрытие дистального сегмента питающей артерии (ЗДПА) и закрытие «мешка» и дистальной питающей артерии (ЗМиДПА). Так, в группу ЗДПА были включены 15 (45,5 %) пациентов, в группу ЗМиДПА — 18 (54,5 %) пациентов. В качестве основного сосудистого доступа у 32 (96,97 %) пациентов была использована общая бедренная вена; в 1 (3,03 %) случае, введу билатерального иллео-феморального тромбоза, в качестве сосудистого доступа была использована яремная вена справа.

Усредненный показатель SpO2 до операции составил 74,75±5,6 %, среднее давление в легочной артерии — 13,5+4,7 мм рт. ст.

По данным ангиометрии диаметр артерио-венозных мальформации в среднем составлял 9,2±5,2 мм.

Во всех случаях удалось успешно закрыть АВМЛ, что было подтверждено инструментально, а также ис-

Таблица 3.

Адаптированная шкала оценки физической активности VSAQ (a и b)

A)

Нам важно знать какой уровень активности является для Вас оптимальным. **Пожалуйста, обведите кругом тот уровень активности, выполняя который вы чувствуете дискомфорт, побуждающий Вас остановиться.**	1	Прием пищи, переодевание, работа за столом
	2	Душ, кратковременный спуск по лестнице, приготовление пищи
	3	Прогулка по плоской поверхности (без подъемов/спусков) около 100–200 м, работа по дому (легкая уборка)
	4	Легкая работа на даче
	5	Бодрая прогулка, средненагруженная работа по дому (мытье машины, уборка квартиры).
	6	Работа на улице (огород, сад). Легкие виды спортивной нагрузки
	7	Тяжелая работа на улице. Подъем в гору, среднего уровня спортивная нагрузка
	8	Тяжелые виды работы по дому (перестановка мебели, ремонтные работы)
	9	Длительная езда на велосипеде.
	10	Плавание брассом, подъем на велосипеде в гору
	11	Подъем объемного груза вверх по лестнице, скоростная езда на велосипеде
	12	Длительный продолжительный бег
	13	Соревновательные виды спорта с длительной физической нагрузкой

B)

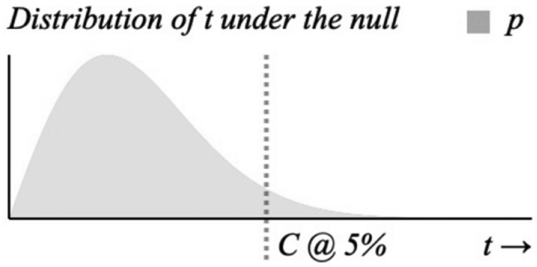
Пожалуйста, отметьте причину, по которой Вам пришлось остановиться	Нехватка дыхания
	Боль в груди
	Сердцебиение
	Мышечная боль или судороги
	Другая (указать)

ходя из увеличения насыщения артериальной крови кислородом. По данным контрольной ангиопульмонографии — подтверждающей отсутствие (n=30; 90,9 %) или незначительный (n=3; 9,1 %) резидуальный сброс по питающей артерии — без заполнения мешка мальформации и наличия сброса по венозному руслу. Насыщение артериальной крови кислородом непосредственно после закрытия/эмболизации АВМЛ возросло в среднем с 74,75±5,6 % до 89,86±3,98 % (Student's T-Test, t(33)=12,452, C=2,292, P<0,001) (рисунок 1).

При контрольном ангиокардиографическом исследовании в средне-отдаленном периоде от 6 до 8 месяцев (в среднем спустя 6,1+2,8 месяца) отмечалось увеличение показателя SpO2 на 4+0,1 % (Paired Student's T-Test, t (33) =13,134, C=1,993, P <0,001). Так, до операции показатель SpO2 менее 70 % отмечался у 11 (33,33 %) пациентов, от 70 до 80 %–18 (54,55 %), от 80 до 90 %–4 (12,12 %). Показатель SpO2 более 90 % не отмечался ни у одного из пациентов. Непосредственно после закрытия/эмболизации показатель SpO2 от 70 до 80 % (74,9+4,8 %) отмечался у 2 (6,1 %) пациентов, от 80 до 90 % (85+2,8 %) у 18 (54,5 %) пациентов, более 90 % (92+1,8 %) у 13 (39,4 %) пациентов. Показатель SpO2 менее 70 % не был зарегистрирован. При контрольном ангиографическом периоде в средне-отдаленном периоде у подавляющего большинства пациентов показатель SpO2 отмечался в пределах 80–90 % (84+3,6 %) и более 90 % (93+3,8 %) (n=18 (54,5 %) и n=15 (45,5 %) соответственно). В свою очередь показатель SpO2 менее 80 % не был отмечен не у кого из пациентов (рисунок 2).

Как было сказано выше, качество жизни пациентов оценивалось различными способами. Одним из методов оценки результативности интервенционного лечения АВМЛ был оценка изменения функционального класса сердечной недостаточности по шкале NYHA при контрольной госпитализации. Так, исходно 17 пациентов (51,5 %) имели II (a) функциональный класс, 5(15,15 %) — II (b) функциональный класс и 11 (33,3 %) пациентов находились в III (a) функциональном классе, исходя из выраженности клинических проявлений.

Спустя 6,1+2,8 месяца после интервенционного закрытия, эмболизации АВМЛ отмечалась достоверная (F(7, 69) = 26,655, C = 2,145, P<0,001) положительная динамика в изменении функционального класса сердечной недостаточности: I функциональный класс — 31 пациент (93,9 %), II (a) функциональный класс — 2 пациента (6,1 %).



VAR	N	Mean	Std Dev	Variance	Minimum	Maximum
(1)	33	74.75000	5.59954	31.35484	65.00000	88.00000
(2)	33	89.87500	3.98181	15.85484	81.00000	97.00000

Means Report

VAR	Mean	95% LCL	95% UCL
(1)	74.75000	72.73115	76.76885
(2)	89.87500	88.43940	91.31060
Mean Difference (1-2)		-15.12500	12.69701 17.55299

t-test assuming equal variances (homoscedastic)

Hypothesized Mean Difference	0.00000				
Mean Difference	-15.12500				
Pooled Variance	23.60484				
Test Statistic	12.45245				
Degrees of Freedom	62				
H1: Mu1 - Mu2 ≠ 0 / Not equal (two-tailed)					
t Critical Value (5%)	1.99897	p-value	0.00000	H1 (5%)	Accepted
H1: Mu1 - Mu2 < 0 / Less than (lower-tailed)					
t Critical Value (5%)	-1.66980	p-value	1.00000	H1 (5%)	Rejected
H1: Mu1 - Mu2 > 0 / Greater than (upper-tailed)					
t Critical Value (5%)	1.66980	p-value	0.00000	H1 (5%)	Accepted

Рис. 1. Графическое отображение статистического анализа динамики изменения показателя SpO2

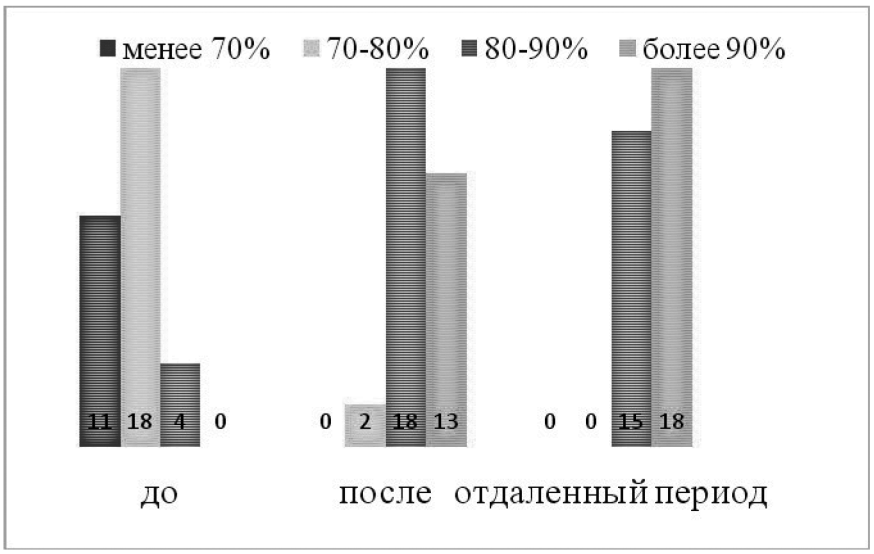


Рис. 2. Изменения показателя SpO2 непосредственно после операции и в отдаленном периоде

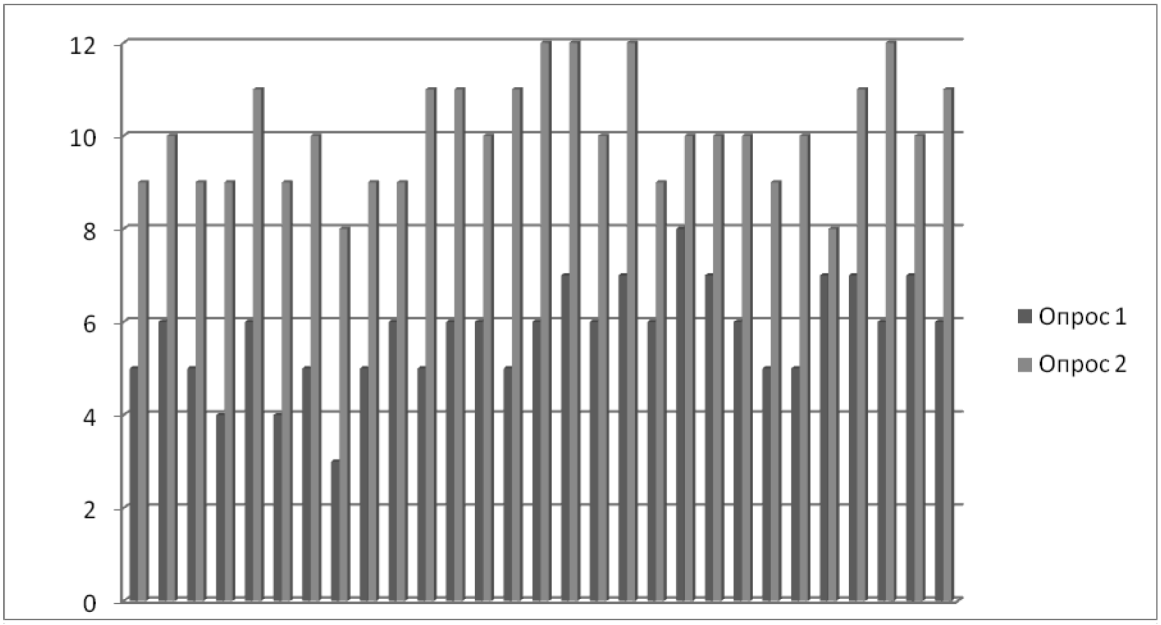


Рис. 3. Сравнение баллов по шкале опроснику VSAQ полученных до закрытия АВМЛ и в отдаленном периоде после оперативного лечения

Другим аспектом оценки качества жизни пациентов было использование шкал опросников VASQ. Данные шкалы заполнялись пациентами в два этапа: первый — в ходе госпитализации и подготовке к интервенционному вмешательству, второй спустя 6,1+2,8 месяца после интервенционного закрытия. В ходе оценки полученных результатов проведенных опросов была сформирована следующая диаграмма (рисунок 3):

В ходе анализа полученных данных и сопоставлении с результатами, полученными в ходе общеклинического обследования, нами было выявлено статистически значимое ($p<0,05$) увеличение порога физической активности пациентов с АВМЛ после интервенционного закрытия фистул и, как следствие, увеличение качества жизни данных пациентов.

Обсуждение

Персистирование артерио-венозных мальформаций легких зачастую является бессимптомным. Пациенты даже со значительным право-левым сбросом крови при дальнейшем общеклиническом обследовании отмечают стойкую адаптацию к данному состоянию [10]. Однако, в ходе нашего исследования было показано, что использование высокочувствительных шкал опросников является эффективным диагностическим маневром в ходе общеклинического обследования пациентов с АВМЛ. Кроме того, двухфакторность данного метода, позволяет

косвенно судить об эффективности выполненной процедуры и, таким образом, оценить влияние АВМЛ на качество жизни данных пациентов, несмотря на высокую степень их адаптации [11,12]. Говоря непосредственно про шкалу (VSAQ) следует отметить, что уникальность данного опросника в контексте обследования пациентов с АВМЛ, заключается в возможности конвертации полученных данных, в так называемые метаболические единицы (MET) [13]. По утверждению авторов данной методики данные метаболические единицы позволяют оценить объем нехватки насыщения кислорода у пациентов в ходе физической активности, что также позволяет судить о тяжести заболевания [14]. Однако ввиду того, что наше исследование является ретроспективным, данный аспект нами не рассматривался. Данные единицы были использованы в различных зарубежных исследованиях для оценки изменения газово-электролитного состава крови у пациентов с АВМЛ, при этом, результаты нашего исследования, перекликались с данными мировой литературы, без статистически значимых отклонений [14,15].

Заключение

Аретрио-венозные мальформации легких довольно редкая патология, характеризующаяся латентной клинической картиной. Использование высокочувствительных шкал опросников является важным дополнением общеклинических обследований данных пациентов, кроме того, двухфакторность данной методики позволяется оценить эффективность проведенного лечения в средне-отдаленном периоде при минимальных затратах и в кратчайшие сроки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алекян Б.Г., Григорян А.М., Стаферов А.В., Карапетян Н.Г. Рентгенэндоваскулярные диагностика и лечение заболеваний сердца и сосудов в Российской Федерации — 2020. Эндоваскулярная хирургия. 2021; 8 (Специальный выпуск): S5-S248. DOI: 10.24183/2409-4080-2021-8S-S5-S248
2. Бокерия Л.А., Милиевская Е.Б., Кудзоева З.Ф., Прянишников В.В., Скопин А.И., Юрлов И.А. Сердечно-сосудистая хирургия — 2018. Болезни и врожденные аномалии системы кровообращения. 2019
3. Odile Enjolras MWaRC. Introduction: ISSVA Classification. London: Cambridge UniversityPress; 2007, pp 2–11.
4. Giordano P., Lenato G.M., Pierucci P., Suppressa P., Altomare M., Del Vecchio G., et al. Effects of VEGF on phenotypic severity in children with hereditary hemorrhagic telangiectasia. J Pediatr Hematol Oncol. 2009; Aug;31(8) 577–582.
5. Cottin V., Plauchu H., Bayle J.Y., et al. Pulmonary arteriovenous malformations in patients with hereditary hemorrhagic telangiectasia. Am J Respir Crit Care Med 2004; 169:994-1000.9.
6. Алекян Б.Г., Пурсанов М.Г., Зеленикин М.М., Ковалев Д.В., Дадабаев Г.М. Рентгенэндоваскулярные вмешательства при артериальной гипоксемии у пациентов после операции Фонтена. Детские болезни сердца и сосудов. 2012; 1: 74–78
7. Алекян Б.Г., Григорян А.М., Стаферов А.В., Карапетян Н.Г. Рентгенэндоваскулярные диагностика и лечение заболеваний сердца и сосудов в Российской Федерации — 2020. Эндоваскулярная хирургия. 2021; 8 (Специальный выпуск): S5-S248. DOI: 10.24183/2409-4080-2021-8S-S5-S248
8. Tellapuri S., Park H., Kalva S. Pulmonary arteriovenous malformations. Int J Cardiovasc Imaging. 2019;3 5(8):1421–1428. doi: 10.1007/s10554-018-1479-x.
9. Duke J., Davis J., Ryan B., et al. Decreased arterial PO2, not O 2 content, increases blood flow through intrapulmonary arteriovenous anastomoses at rest. J Physiology. 2016; 594:4981–96.
10. Gill S., Roddie M., Shovlin C., et al. Pulmonary arteriovenous malformations, and their mimics. Clin Radiol 2015; 70:96–110.
11. Kojima S., Wang D., Tokumori K., et al. Practicality of Veterans Specific Activity Questionnaire in evaluation of exercise capacity of community-dwelling Japanese elderly. Environ Health Prev Med. 2006;11(6):313–20. doi: 10.1007/BF02898022.
12. Gawecki F., Myers J., Shovlin C.L. Veterans Specific Activity Questionnaire (VSAQ): a new and efficient method of assessing exercise capacity in patients with pulmonary arteriovenous malformations. BMJ Open Respir Res. 2019; 6(1): 35–42. doi: 10.1136/bmjresp-2018-000351.
13. Shovlin C.L., Condliffe R., Donaldson J.W., et al. British Thoracic Society Clinical Statement on Pulmonary Arteriovenous Malformations. Thorax 2017; 72:1154–63.
14. Kojima S., Wang D.H., Tokumori K., et al. Practicality of veteran's specific activity questionnaire in evaluation of exercise capacity of community-dwelling Japanese elderly. Environ Health Prev Med. 2006;313–20.
15. Rizvi A., Macedo P., Babawale L., et al. Hemoglobin Is a Vital Determinant of Arterial Oxygen Content in Hypoxemic Patients with Pulmonary Arteriovenous Malformations. Ann Am Thorac Soc. 2017;14(6):903–911. doi: 10.1513/AnnalsATS.201611-872OC

© Петросян Карен Валерьевич (dr.petrosian@gmail.com); Хакимов Хуршид Анварович (khakimov.khurshid@bk.ru);
Дадабаев Гуламжан Мураджанович (dgmed83_83@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.32

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О РОЛИ МИКРОБИОТЫ КИШЕЧНИКА ПРИ КОЛОРЕКТАЛЬНОМ РАКЕ

CURRENT IDEAS ABOUT THE ROLE OF INTESTINAL MICROBIOTA IN COLORECTAL CANCER

G. Pogosov
V. Oshchepkov
E. Rudaeva
V. Efetov

Summary. Currently, there is increasing evidence of the pathogenetic significance of the intestinal microbiome in the development of colorectal cancer. The purpose of the study. Analysis of current understanding of the intestinal microbiota in colorectal cancer, including the possibilities of clinical application of this knowledge and known methods for stratifying the risk of disease development, using intestinal strains as biomarkers. An analysis of the literature was carried out in the following electronic scientific databases: PubMed, Cochrane Library, Springer, Scopus, Cyberleninka, elibrary.ru — for the period from 2011 to 2024. The review included original research results, reviews, and meta-analyses. Editorials articles, conference abstracts, and letters to the editor were excluded. Protocols studies, interim results of ongoing studies were included. Key words used to define the terms of participation in the review: 'intestinal microbiome', «colorectal cancer», «metagenomic research», «bowel cancer», 'microbiota transplantation', «colorectal cancer markers», «probiotics», 'prebiotics.' Priority was given to articles published within three and five years prior to the writing of the review, as well as original studies investigating the microbiota in colorectal cancer. Microbiota features in colorectal cancer by means of modern methods of sequencing; and studies demonstrating the clinical application of knowledge of disease-specific changes in the gut microbiome, and non-invasive methods of predicting disease progression by recording the enrichment/deficiency of specific strains. The analysis of literature data shows the involvement of the intestinal microbiome in carcinogenesis, changes in the taxonomic composition of the microbiome associated with colorectal cancer. Colorectal cancer is accompanied by changes in the abundance of F. nucleatum, B. fragilis, P. micra, S. moorei and P. Stomatis, A. fingoldii, P. asaccharolytica, R. intestinalis and F. Prausnitzii. This knowledge has been successfully applied in clinical practice, by complementing traditional therapeutic strategies with pro- and prebiotics, and the possibility of fecal transplantation is being actively explored. In addition, new methods for predicting and diagnosing the disease are being developed by analyzing changes in the microbiome. The described scientific results may be useful in future studies to confirm the association of the microbiome with colorectal cancer, develop new therapeutic strategies and prognostic approaches.

Keywords: intestinal microbiome, colorectal cancer, metagenomic studies, microbiota transplantation, probiotics, prebiotics, markers of colorectal cancer.

Погосов Гарри Сергеевич
врач-онколог, ООО Клиника Генезис, г. Симферополь
Madkemerovo@mail.ru
Ощепков Василий Николаевич
кандидат медицинских наук, главный врач, ГБУЗ С СГОД им. А.А. Задорожного, г. Севастополь
basile-os@yandex.ru
Рудаева Елена Владимировна
кандидат медицинских наук, доцент, ФГБОУ ВО Кемеровский государственный медицинский университет
rudaevae@mail.ru
Ефетов Владимир Сергеевич
врач-онколог, ООО Клиника Генезис, г. Симферополь
bint@mail.ru

Аннотация. В настоящее время, появляется всё больше доказательств патогенетического значения кишечного микробиома в развитии колоректального рака. *Цель исследования*. Анализ современных представлений о микробиоте кишечника при колоректальном раке, включая возможности клинического применения этих знаний и известные методы стратификации риска развития заболевания, путем использования кишечных штаммов в качестве биомаркеров. Проведен анализ литературы в следующих электронных научных базах: PubMed, Cochrane Library, Springer, Scopus, Киберленинка, elibrary.ru — за период с 2011 по 2024 гг. В обзор были включены оригинальные результаты исследований, обзоры, мета-анализы. Редакционные статьи, тезисы конференций, письма в редакцию были исключены. Протоколы исследований, промежуточные результаты продолжающихся исследований были учтены. Ключевые слова, используемые для определения условий участия в обзоре: «кишечный микробиом», «колоректальный рак», «метагеномные исследования», «рак кишечника», «трансплантация микробиоты», «маркеры колоректального рака», «пробиотики», «пребиотики». Приоритет был отдан статьям, опубликованным в течении трех и пяти лет до написания обзора, а также оригинальным исследованиям, изучающим особенности микробиоты при колоректальном раке посредством современных методов секвенирования, а также исследованиям, демонстрирующим клиническое применения знаний о специфичных для заболевания изменений кишечного микробиоценоза, и неинвазивные методы прогнозирования развития заболевания путем регистрации обогащения/дефицита определенных штаммов. Проведенный анализ литературных данных показал вовлеченность кишечного микробиома в канцерогенез, изменения таксономического состава микробиома ассоциированого с колоректальным раком. В частности, колоректальный рак сопровождается изменениями численности F. nucleatum, B. fragilis, P. micra, S. moorei и P. Stomatis, A. finegoldii, P. asaccharolytica, R. intestinalis и F. Prausnitzii. Эти знания успешно применяются в клинической практике, путем дополнения традиционных терапевтических стратегий про- и пребиотиками, исследуется возможность фекальной трансплантации. Помимо этого, разрабатываются новые методы прогнозирования и диагностики заболевания, путем анализа изменений микробиома. Описанные научные результаты могут быть полезны в буду-

щих исследованиях, для подтверждения связи ассоциации микробиома с колоректальным раком, разработки новых терапевтических стратегий и прогностических подходов.

Ключевые слова: кишечный микробиом, колоректальный рак, метагеномные исследования, трансплантация микробиоты, пробиотики, пребиотики, маркеры колоректального рака.

Введение

Можно смело утверждать, что ученые для того и существуют, чтобы задаваться странными вопросами о том или ином явлении природы и изучать их, а после составлять научные трактаты. Эти научные труды, по мнению многих, являются свидетельством научного прогресса. В то же время, по меткому выражению Стивена Хокинга: «Прогресс состоит не в замене неверной теории на верную, а в замене одной неверной теории на другую неверную, но уточненную. К числу популярных в последнее время, но далеких от очевидности, можно отнести теорию о роли микробиоты кишечника в возникновении целого ряда заболеваний, как не связанных с пищеварительным трактом, например депрессия, так и связанных, но не очевидным образом, например таких, как злокачественные новообразования желудочно-кишечного тракта [1].

Кишечная микробиота представляет собой сложное сообщество микроорганизмов, которые населяют пищеварительную систему человека и живут в симбиозе с хозяином. Непосредственная близость к колоректальному эпителию, позволяет популяции кишечной микрофлоры взаимодействовать с клетками хозяина, тем самым регулируя значительный пласт физиологических процессов, включая метаболические реакции и иммунный ответ [2]. Микробиота обеспечивает барьерные функции воздействия канцерогенных факторов на эпителий кишечника и является значимым элементом супрессии опухолевого процесса [3]. С другой стороны, имеется ряд свидетельств о самостоятельной роли микробиоты желудочно-кишечного тракта в канцерогенезе опухолей толстой кишки, причем ряд авторов отдает ключевую роль микроорганизмам колонизирующих ротовую полость [4]. В целом, при оценке роли микробиоты канцерогене опухолей кишечника превалирует экологическая модель, подразделяющая микроогранизмы на «хорошие» и «вредные» [5]. В то же время нет однозначных подтверждающих исследований этой модели. И это при том, что около 10 % всех новых случаев рака приходится на колоректальный рак, что выводит заболевание на второе место по смертности и третье место по заболеваемости среди всех злокачественных новообразований в мире [2]. Согласно некоторым прогнозам, колоректальный рак может стать наиболее доминирующим злокачественным новообразованием в мире, превзойдя по заболеваемости наиболее распространенные, на сегодняшний день, рак молочной железы и рак легких примерно к 2030 и 2040 годам соответственно [6]. Последнее делает проблему крайне актуальной и требующей скрупулезного изучения.

Наиболее достоверным методом исследования изменений микробного состава и экологии пищеварительного тракта у пациентов с колоректальным раком, являются генетические исследования. Секвенирование 16S рРНК и метагеномные исследования, позволили идентифицировать различные роды и виды кишечных микроорганизмов, которые были ассоциированы с колоректальным раком (были истощены или обогащены у больных колоректальным раком). Помимо этого, в современном научном пространстве уделяется внимание функциональным исследованиям на животных моделях, для более точной идентификации роли конкретных штаммов в колоректальном канцерогенезе, например, Fusobacterium nucleatum и некоторые штаммы Escherichia coli и Bacteroides fragilis. Полученные знания о штаммах, предикторах колоректального рака, активно используются для разработки точных прогностических методов ранней диагностики заболевания.

В статье представлен анализ современных представлений о микробиоте кишечника при колоректальном раке, включая возможности клинического применения этих знаний и известные методы стратификации риска развития заболевания, путем использования кишечных штаммов в качестве биомаркеров.

Материалы и методы

Был проведен анализ литературы в следующих электронных научных базах: PubMed, Cochrane Library, Springer, Scopus, Киберленинка, elibrary.ru — за период с 2011 по 2024 гг. В обзор были включены оригинальные результаты исследований, обзоры, мета-анализы. Редакционные статьи, тезисы конференций, письма в редакцию были исключены. Протоколы исследований, промежуточные результаты продолжающихся исследований были учтены. Ключевые слова, используемые для определения условий участия в обзоре: «кишечный микробиом», «колоректальный рак», «метагеномные исследования», «рак кишечника», «трансплантация микробиоты», «маркеры колоректального рака», «пробиотики», «пребиотики». Приоритет был отдан статьям, опубликованным в течении трех и пяти лет до написания обзо-

ра, а также оригинальным исследованиям, изучающим особенности микробиоты при колоректальном раке посредством современных методов секвенирования, а также исследованиям, демонстрирующим клиническое применение знаний о специфичных для заболевания изменений кишечного микробиоценоза и неинвазивные методы прогнозирования развития заболевания путем регистрации обогащения/дефицита определенных штаммов. Ограничений на языковой уклон публикации введено не было.

Изменения кишечного микробиоценоза, ассоциированные с колоректальным раком

К наиболее известным видам бактерий, обсемененность которыми достоверно повышается при колоректальном раке, относятся F. nucleatum, B. fragilis, P. micra, S. moorei и P. Stomatis [7,8]. Данные виды бактерий чаще всего встречаются в исследованиях глобальных когорт, которые включали участников из разных этнических групп и географических регионов. Менее известны и выявлены в ограниченном ряде исследований количественные изменения видов A. finegoldii, P. asaccharolytica, R. intestinalis и F. Prausnitzii [9].

Fusobacterium nucleatum считается основной онкобактерией и по данным целого ряда публикаций ассоциирован с развитием колоректального рака [10]. Обнаружено, что у больных с метастатическим колоректальным раком, которые не реагировали на иммунотерапию, отмечалось увеличение численности Fusobacterium nucleatum и повышенный уровень янтарной кислоты [11]. Fusobacterium nucleatum индуцирует химиорезистентность к колоректальному раку, посредством модулирования аутофагии [12].

P. Asaccharolytica, грамотрицательная анаэробная палочка и инфекционный патоген, демонстрирующий доминирование при колоректальном раке [9]. Также в недавних исследованиях был выявлен новый род в типе Bacteroides — Alistipes. Считается, что Alistipes может играть существенную роль в патогенезе колоректального рака и некоторых психических расстройств [13].

Клиническое применение знаний о роли микробиоты в развитии колоректального рака

Huang и коллеги оценили потенциальную эффективность пробиотикотерапии у пациентов с колоректальным раком, получающих химиотерапию после радикальной операции. Было проведено высокопроизводительное секвенирование 16S рРНК и анализ короткоцепочечных жирных кислот (SCFA) до операции и после первого цикла химиотерапии после операции. Исследование показало, что прием комбинированных пробиотиков в начале послеоперационного периода и до окончания курса химиотерапии способствует ослаблению желудочно-кишечных осложнений, таких как тошнота, кислотный рефлюкс, болевой синдром, вздутие живота, запор и диарея. Помимо этого, химиотерапия значительно снижает бактериальное разнообразие кишечной микробиоты у пациентов, наблюдается снижение уровня Firmicutes (Prevotella, Lactobacillus и Roseburia) и увеличение численности Bacteroidetes, Proteobacteria и Verrucomicrobia (Akkermansia и Clostridium). А введение пробиотиков позволяет значительно восстановить микробиологическое разнообразие [14].

В другом исследовании было показано, что прием лакто— и бифидобактерий может менять кишечное микроокружение, что подтверждается снижением уровня провоспалительных цитокинов (TNF-α, IL-6, IL-10, IL-12, IL-17A, IL-17C и IL-22) у пациентов с колоректальным раком. Однако, диарея после химиотерапии наблюдалась у всех участников, вне зависимости от приема пробиотиков [15].

Предпринимаются попытки восстановления кишечного дисбаланса у пациентов с колоректальным раком, посредством диетических вмешательств. В частности, путем увеличения пребиотических продуктов. Проведены исследования, положительно оценившие роль бобовых в улучшении микробного разнообразия у больных с колоректальной неоплазией. Было показано увеличение количества Faecalibacterium, Eubacterium и бифидобактерий [16]. Другие исследования также отмечают положительное влияние пребиотиков, в частности, фруктоолигосахаридов, ксилоолигосахаридов, полидекстрозы и декстрина на иммунные функции и общую структуру кишечной микробиоты у периоперационных пациентов с колоректальным раком. Пребиотики позволили повысить численность симбиотических микроорганизмов, а также бифидобактерий и энтерококков, которые значительно пострадали, в том числе при воздействии хирургического стресса, и уменьшить количество условно-патогенных микроорганизмов и симменсальной микробиоты, что подтверждалось результатами секвенирования [17].

В пользу диетической коррекции свидетельствуют проведенные эпидемиологические исследования, демонстрирующие повышение риска развития колоректального рака при чрезмерном потреблении красного и переработанного мяса [18]. Помимо этого, диетический подход подкреплен результатами сравнительных анализов влияния диетических профилей на подтвержденные биомаркеры риска развития рака кишечника [19,20]. Также, известно, что пища, богатая гемовым железом обуславливает негативные изменения кишечной микробиоты, а микробная ферментация пищи растительного происхождения приводит к увеличению кишечных короткоцепочечных жирных кислот, которые обеспечивают противоопухолевую активность за счет ингибирования гистондеацетилазы, стимулирования апоптоза и повышения количества фитохимических ве-

ществ, активированных кишечными микроорганизмами [21,22]. Полифенолы, демонстрируют выраженные антиоксидантные и противовоспалительные свойства [23].

В качестве перспективного метода подавления прогрессирования колоректального рака рассматривается трансплантация фекальной микробиоты. Исследовательский интерес к данной терапевтической стратегии обусловлен растущей заболеваемостью, а также связан с тем, что традиционные методы лечения колоректального рака, такие как хирургическая резекция тканей, разрушение или ингибирование опухолевых клеток посредством химио- или радиотерапии, повреждают здоровые ткани, ослабляют иммунную систему, что делает пациента более уязвимым к инфекциям и новым злокачественным новообразованиям. Экспериментальные исследования демонстрируют, что здоровая микробиота донора способна ингибировать развитие колоректального рака у реципиента путем торможения и обращения вспять кишечных микробных нарушений, уменьшения чрезмерного воспаления кишечника, а также посредством тесного взаимодействия с антиканцерогенными иммунными реакциями [23,24,25].

Перспективные методы прогнозирования и диагностики колоректального рака путем определения уровня штаммов-предикторов

В настоящее время, разрабатываются различные скрининговые подходы для ранней диагностики колоректального рака, посредством выявления особенностей микробиоценоза кишечника [26]. Предлагаются алгоритмы классификации на основе микробиома, как одного из важных биомаркеров пригодного для скрининга колоректального рака, наряду с диетой, образом жизни и иными лабораторными показателями [27]. Помимо этого, повышенное внимание уделяется идентификации филогенетических и функциональных особенностей бактериальных биомаркеров, которые могут потенциально ассоциироваться с колоректальным раком. Wu и коллеги, на основании крупного метагеномного секвенирования, моделируют точный биноминальный классификатор, с высокой чувствительностью и специфичностью, призванный облегчить диагностику колоректального рака [13].

Проводится проспективное перекрестное исследование, в котором планируется использование панели из четырех бактериальных генных маркеров, для максимально возможной точной оценки диагностики предраковых поражений и запущенной неоплазии с использованием количественного метода ПЦР. Исследование еще продолжается [28]. Другие исследователи прибегают к использованию жидкостной хроматографии с возможностями масс-спектрометрия (LC-MS) с целью тестирования панели сывороточных метаболитов, которые могут быть связаны с кишечной микрофлорой, для скрининга колоректального рака или поздних стадий аденом кишечника [29].

Согласно результатам исследования Xie и коллег, в качестве биомаркера для раннего и неинвазивного выявления колоректального рака потенциально пригоден штамм C. Symbiosum. Сочетание определения C. Symbiosum, фекального иммунохимического теста, и карциноэмбрионального антигена, по предположениям исследователей, будет более эффективным, чем сочетание с определением F. Nucleatum [17]. Исследователи отмечают, насколько важно определение Fusobacterium nucleatum в неинвазивном прогнозировании колоректального рака и колоректальной аденомы. Было обнаружено, что высокое содержание F. nucleatum в фекалиях служит независимым фактором риска развития метахронных аденом. Данное исследование было проведено в ретроспективной когорте, затем подтверждено в проспективной когорте со специфичностью 65,00 % и чувствительностью 73,04 % [30]. Показана роль Fusobacterium nucleatum и Escherichia coli с геном pks в ранней диагностике колоректального рака. Методика демонстрировала наибольшую эффективность в комбинации с определением обычных опухолевых маркеров, таких как анализ кала на скрытую кровь (FOBT) и маркеры CEA, CA19-9 [31]. Также отмечено, что ПЦР анализ уровней Fusobacterium nucleatum и отдельных генов токсина Escherichia coli в кале может быть полезно при включении в более широкую панель биомаркеров для неинвазивного тестирования на колоректальный рак [32].

Определенно, результаты описанных исследований могут в дальнейшем играть важную роль для стратификации риска и ранней диагностики колоректального рака на основе микробиома.

Заключение

Проведенный нами анализ литературного материала продемонстрировал вовлеченность кишечной микробиоты в канцерогенез. С другой стороны, наблюдается дефицит проспективных исследований связи микробиома и колоректальных новообразований. Изменения микробного разнообразия ассоциированы с колоректальным раком, однако, требуются дальнейшие проспективные исследования.

Большинство авторов свидетельствуют о высоком потенциале использования микробиоты в качестве биомаркера колоректального рака для дополнительного изучения пребиотической эффективности и положительного эффекта пробиотических вмешательств, в качестве, как минимум, новых альтернативных или суплементарных терапевтических стратегий. А в перспективе, о разработке новых методов профилактики или лечения колоректального рака на основе знания механизмов модуляции микробиоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. J.M. Sasso, R.M. Ammar, R. Tenchov, et al, Gut Microbiome–Brain Alliance: A Landscape View into Mental and Gastrointestinal Health and Disorders// ACS Chem Neurosci. 2023 May 17; 14(10): 1717–1763.
2. Wong S.H., Yu J. Gut microbiota in colorectal cancer: mechanisms of action and clinical applications. Nat Rev Gastroenterol Hepatol. 2019 Nov;16(11):690-704. doi: 10.1038/s41575-019-0209-8. Epub 2019 Sep 25. PMID: 31554963.
3. Sadrekarimi H., Gardanova Z.R., Bakhshesh M., Ebrahimzadeh F., Yaseri A.F., Thangavelu L., Hasanpoor Z., Zadeh F.A., Kahrizi M.S. Emerging role of human microbiome in cancer development and response to therapy: special focus on intestinal microflora. J Transl Med. 2022 Jul 6;20(1):301.
4. Stasiewicz M., Karpiński T.M. The oral microbiota and its role in carcinogenesis. Semin Cancer Biol. 2022 Nov;86(Pt 3):633–642.
5. Cheng Y., Ling Z., Li L. The Intestinal Microbiota and Colorectal Cancer. Front Immunol. 2020 Nov 30; 11:615056.
6. Soerjomataram I., Bray F. Planning for tomorrow: global cancer incidence and the role of prevention 2020-2070. Nat Rev Clin Oncol (2021) 18(10):663–72. doi: 10.1038/s41571-021-00514-z
7. Byrd D.A., Vogtmann E., Ortega-Villa A.M., Wan Y., Gomez M., Hogue S., Warner A., Zhu B., Dagnall C., Jones K., Hicks B., Albert P.S., Murphy G., Sinha R. Prospective and Cross-sectional Associations of the Rectal Tissue Microbiome with Colorectal Adenoma Recurrence. Cancer Epidemiol Biomarkers Prev. 2023 Mar 6;32(3):435-443. doi: 10.1158/1055-9965.EPI-22-0608. PMID: 36525653; PMCID: PMC9992132.
8. Yu L., Zhao G., Wang L., Zhao X., Sun J., Li X., et al. A systematic review of microbial markers for risk prediction of colorectal neoplasia. Br J Cancer (2022) 126(9):1318–28. doi: 10.1038/s41416-022-01740-7
9. Dai Z., Coker O.O., Nakatsu G., Wu W.K.K., Zhao L., Chen Z., et al. multi-cohort analysis of colorectal cancer metagenome identified altered bacteria across populations and universal bacterial markers. Microbiome (2018) 6(1):70. doi: 10.1186/s40168-018-0451-2.
10. Wang N., Fang J.Y. Fusobacterium nucleatum, a key pathogenic factor and microbial biomarker for colorectal cancer. Trends Microbiol. 2023 Feb;31(2):159–172. doi: 10.1016/j.tim.2022.08.010.
11. Jiang S.S., Xie Y.L., Xiao X.Y., Kang Z.R., Lin X.L., Zhang L., Li C.S., Qian Y., Xu P.P., Leng X.X., Wang L.W., Tu S.P., Zhong M., Zhao G., Chen J.X., Wang Z., Liu Q., Hong J., Chen H.Y., Chen Y.X., Fang J.Y. Fusobacterium nucleatum-derived succinic acid induces tumor resistance to immunotherapy in colorectal cancer. Cell Host Microbe. 2023 May 10;31(5):781–797.e9. doi: 10.1016/j.chom.2023.04.010.
12. Yu T., Guo F., Yu Y., Sun T., Ma D., Han J., Qian Y., Kryczek I., Sun D., Nagarsheth N., Chen Y., Chen H., Hong J., Zou W., Fang J.Y. Fusobacterium nucleatum Promotes Chemoresistance to Colorectal Cancer by Modulating Autophagy. Cell. 2017 Jul 27;170(3):548–563.e16. doi: 10.1016/j.cell.2017.07.008.
13. Wu X., Tang Z., Zhao R., Wang Y., Wang X., Liu S., Zou H. Taxonomic and functional profiling of fecal metagenomes for the early detection of colorectal cancer. Front Oncol. 2023 Aug 3; 13:1218056. doi: 10.3389/fonc.2023.1218056.
14. Huang F., Li S., Chen W., Han Y., Yao Y., Yang L., Li Q., Xiao Q., Wei J., Liu Z., Chen T., Deng X. Postoperative Probiotics Administration Attenuates Gastrointestinal Complications and Gut Microbiota Dysbiosis Caused by Chemotherapy in Colorectal Cancer Patients. Nutrients. 2023 Jan 11;15(2):356. doi: 10.3390/nu15020356. PMID: 36678227; PMCID: PMC9861237.
15. Zaharuddin L., Mokhtar N.M., Muhammad Nawawi K.N., Raja Ali R.A. A randomized double-blind placebo-controlled trial of probiotics in post-surgical colorectal cancer. BMC Gastroenterol. 2019 Jul 24;19(1):131. doi: 10.1186/s12876-019-1047-4. PMID: 31340751; PMCID: PMC6657028
16. Zhang X., Irajizad E., Hoffman K.L., Fahrmann J.F., Li F., Seo Y.D., Browman G.J., Dennison J.B., Vykoukal J., Luna P.N., Siu W., Wu R., Murage E., Ajami N.J., McQuade J.L., Wargo J.A., Long J.P., Do K.A., Lampe J.W., Basen-Engquist K.M., Okhuysen P.C., Kopetz S., Hanash S.M., Petrosino J.F., Scheet P., Daniel C.R. Modulating a prebiotic food source influences inflammation and immune-regulating gut microbes and metabolites: insights from the BE GONE trial. EBioMedicine. 2023 Dec; 98:104873. doi: 10.1016/j.ebiom.2023.104873
17. Xie X., He Y., Li H., Yu D., Na L., Sun T., Zhang D., Shi X., Xia Y., Jiang T., Rong S., Yang S., Ma X., Xu G. Effects of prebiotics on immunologic indicators and intestinal microbiota structure in perioperative colorectal cancer patients. Nutrition. 2019 May; 61:132–142. doi: 10.1016/j.nut.2018.10.038.
18. Di Y., Ding L., Gao L., Huang H. Association of meat consumption with the risk of gastrointestinal cancers: a systematic review and meta-analysis. BMC Cancer. 2023 Aug 23;23(1):782
19. Sofi F., Dinu M., Pagliai G., Pierre F., Gueraud F., Bowman J., Gerard P., Longo V., Giovannelli L., Caderni G., de Filippo C. Fecal microbiome as determinant of the effect of diet on colorectal cancer risk: comparison of meat-based versus pesco-vegetarian diets (the MeaTIc study). Trials. 2019 Dec 9;20(1):688. doi: 10.1186/s13063-019-3801-x. PMID: 31815647; PMCID: PMC6902610.
20. Abu-Ghazaleh N., Chua W.J., Gopalan V. Intestinal microbiota and its association with colon cancer and red/processed meat consumption. J Gastroenterol Hepatol. 2021 Jan;36(1):75–88. doi: 10.1111/jgh.15042. Epub 2020 Apr 3. PMID: 32198788.
21. Martin O.C., Lin C., Naud N., Tache S., Raymond-Letron I., Corpet D.E., Pierre F.H. Antibiotic suppression of intestinal microbiota reduces heme-induced lipoperoxidation associated with colon carcinogenesis in rats. Nutr Cancer. 2015; 67:119–125. doi: 10.1080/01635581.2015.976317.
22. Bultman S.J. Molecular pathways: gene-environment interactions regulating dietary fiber induction of proliferation and apoptosis via butyrate for cancer prevention. Clin Cancer Res. 2014; 20:799–803. doi: 10.1158/1078-0432.CCR-13-2483.
23. O'Keefe S.J. Diet, microorganisms and their metabolites, and colon cancer. Nat Rev Gastroenterol Hepatol. 2016; 13:691–706. doi: 10.1038/nrgastro.2016.165.
24. Yu H., Li X.X., Han X., Chen B.X., Zhang X.H., Gao S., Xu D.Q., Wang Y., Gao Z.K., Yu L., Zhu S.L., Yao L.C., Liu G.R., Liu S.L., Mu X.Q. Fecal microbiota transplantation inhibits colorectal cancer progression: Reversing intestinal microbial dysbiosis to enhance anti-cancer immune responses. Front Microbiol. 2023 Apr 18; 14:1126808. doi: 10.3389/fmicb.2023.1126808. PMID: 37143538; PMCID: PMC10151806.
25. Кочкина С.О., Гордеев С.С., Мамедли З.З. Влияние микробиоты человека на развитие колоректального рака // Хирургия и онкология. 2019. №3. С.11–17.

26. Kværner A.S., Birkeland E., Bucher-Johannessen C., Vinberg E., Nordby J.I., Kangas H., Bemanian V., Ellonen P., Botteri E., Natvig E., Rognes T., Hovig E., Lyle R., Ambur O.H., de Vos W.M., Bultman S., Hjartåker A., Landberg R., Song M., Blix H.S., Ursin G., Randel K.R., de Lange T., Hoff G., Holme Ø., Berstad P., Rounge T.B. The CRCbiome study: a large prospective cohort study examining the role of lifestyle and the gut microbiome in colorectal cancer screening participants. BMC Cancer. 2021 Aug 18;21(1):930. doi: 10.1186/s12885-021-08640-8. PMID: 34407780; PMCID: PMC8371800.
27. Еремеева И.А., Багдасарова Д.В., Артемова Е.В., Коломейцева А.А., Феденко А.А. Колоректальный рак и микробиота кишечника. Онкология. Журнал им. П.А. Герцена. 2024;13(2):60 66.
28. Liang J.Q., Li T., Nakatsu G., Chen Y.X., Yau T.O., Chu E., et al.. A novel faecal Lachnoclostridium marker for the non-invasive diagnosis of colorectal adenoma and cancer. Gut (2020) 69(7):1248–57. doi: 10.1136/gutjnl-2019-318532.
29. Chen F., Dai X., Zhou C.C., Li K.X., Zhang Y.J., Lou X.Y., et al.. Integrated analysis of the faecal metagenome and serum metabolome reveals the role of gut microbiome-associated metabolites in the detection of colorectal cancer and adenoma. Gut (2022) 71(7):1315–25. doi: 10.1136/gutjnl-2020-323476
30. Xue J.H., Xie Y.H., Zou T.H., Qian Y., Kang Z.R., Zhou C.B., Pan S.Y., Xia T.X., Chen Y.X., Fang J..Y. Fecal Fusobacterium nucleatum as a predictor for metachronous colorectal adenoma after endoscopic polypectomy. J Gastroenterol Hepatol. 2021 Oct;36(10):2841–2849. doi: 10.1111/jgh.15559. Epub 2021 Jun 16. PMID: 34121231.
31. Liu K., Yang X., Zeng M., Yuan Y., Sun J., He P., Sun J., Xie Q., Chang X., Zhang S., Chen X., Cai L., Xie Y., Jiao X. The Role of Fecal Fusobacterium nucleatum and pks+ Escherichia coli as Early Diagnostic Markers of Colorectal Cancer. Dis Markers. 2021 Nov 22; 2021:1171239. doi: 10.1155/2021/1171239. PMID: 34853619; PMCID: PMC8629656.
32. Tunsjø H.S., Gundersen G., Rangnes F., Noone J.C., Endres A., Bemanian V. Detection of Fusobacterium nucleatum in stool and colonic tissues from Norwegian colorectal cancer patients. Eur J Clin Microbiol Infect Dis. 2019 Jul;38(7):1367–1376. doi: 10.1007/s10096-019-03562-7. Epub 2019 Apr 25. Erratum in: Eur J Clin Microbiol Infect Dis. 2020 Jan;39(1):213. doi: 10.1007/s10096-019-03712-x. PMID: 31025134.

© Погосов Гарри Сергеевич (Madkemerovo@mail.ru); Ощепков Василий Николаевич (basile-os@yandex.ru);
Рудаева Елена Владимировна (rudaevae@mail.ru); Ефетов Владимир Сергеевич (bint@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.35

ОСОБЕННОСТИ ОРТОПЕДИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ С ГЛУБОКОЙ РЕЗЦОВОЙ ДИЗОККЛЮЗИЕЙ И УМЕНЬШЕНИЕМ ВЫСОТЫ ГНАТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЛИЦА: КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ

FEATURES OF ORTHOPEDIC TREATMENT OF PATIENTS WITH DEEP INCISOR DISOCCLUSION AND A DECREASE IN THE HEIGHT OF THE GNATHIC PART OF THE FACE: A CLINICAL CASE

M. Rozhkova
T. Berezkina
S. Fischev
A. Sevastyanov
S. Pavlova
M. Puzdyreva
A. Shtorina
I. Orlova

Summary. Deep incisor malocclusion impairs aesthetics and causes significant functional and morphological changes in the masticatory system, which become most evident in adulthood. Excessive overbite, by blocking mandibular movements, can lead to the development of temporomandibular joint disorders. Furthermore, partial tooth loss can significantly increase the severity of the clinical picture. A rational orthopedic treatment plan for patients is proposed, improving occlusal relationships, chewing function, and aesthetics.

Keywords: orthopedics, deep incisor malocclusion, morphometry, malocclusion, temporomandibular joint tomography.

Рожкова Мария Геннадьевна
Кандидат медицинских наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
rozmaria2010@yandex.ru
Березкина Татьяна Николаевна
Ассистент, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
mail332@mail.ru
Фищев Сергей Борисович
Доктор медицинских наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
super.kant@yandex.ru
Севастьянов Аркадий Владимирович
Доктор медицинских наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
ardy.dkr@mail.ru
Павлова Светлана Георгиевна
Кандидат медицинских наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
svetap_75@mail.ru
Пуздырева Маргарита Николаевна
Кандидат медицинских наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
seven-spb@yandex.ru
Шторина Анастасия Александровна
Кандидат медицинских наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
nastiya78@mail.ru
Орлова Ирина Викторовна
Кандидат медицинских наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
orisha@mail.ru

Аннотация. Глубокая резцовая дизокклюзия приводит к нарушению эстетики, вызывает серьёзные функциональные и морфологические изменения жевательного аппарата, которые наиболее отчётливо проявляются во взрослом возрасте. Чрезмерное резцовое перекрытие, вызывая блокирование движений нижней челюсти, может служить причиной развития заболеваний височно-нижнечелюстного сустава. Кроме того, частичная потеря зубов, может существенно усилить тяжесть клинической картины

заболевания. Предложен рациональный план ортопедического лечения пациентов с улучшением окклюзионных взаимоотношений, функции жевания и эстетики.

Ключевые слова: ортопедия, глубокая резцовая дизокклюзия, морфометрия, аномалии прикуса, томография височно-нижнечелюстных суставов.

Глубокая резцовая дизокклюзия приводит к нарушению эстетики, вызывает серьёзные функциональные и морфологические изменения жевательного аппарата, которые наиболее отчётливо проявляются во взрослом возрасте. Чрезмерное резцовое перекрытие, вызывая блокирование движений нижней челюсти, может служить причиной развития заболеваний височно-нижнечелюстного сустава. Кроме того, частичная потеря зубов, может существенно усилить тяжесть клинической картины заболевания (Каливраджиян Э.С., 1999; Фадеев Р.А., 2001; Лебеденко И.Ю., 2004; Фищев С.Б., 2008).

Большинство специалистов указывают на то, что привычная окклюзия у пациентов с глубокой резцовой дизокклюзией становится устойчивой и затрудняет последующее протезирование, направленное, в первую очередь, на восстановление (нормализацию) межальвеолярной высоты [1–4].

Подавляющее большинство исследований посвящено изучению вопросов диагностики и лечения аномалий у детей. В то же время, глубокая резцовая дизоклюзия, не устранённая в детском возрасте, у взрослых, вызывает большие страдания и трудности в лечении. Остаются недостаточно изученными функциональные нарушения в зубочелюстной области при глубокой резцовой окклюзии и дизокклюзии [5, 6]. Не однозначно мнение специалистов по выбору методов комплексного лечения данной группы пациентов [7–9].

Различные мнения высказываются по поводу методов и сроков ортодонтического лечения различных форм глубокой резцовой дизокклюзии, конструкции временных аппаратов и постоянных протезов, а также материалов для их изготовления. Нет четких рекомендаций по проведению комплексного лечения у пациентов с различными формами снижения высоты гнатической части лица. Все это и предопределило цель и задачи настоящего исследования [10, 11].

Нами обследованы и получили ортопедическое лечение 29 пациентов с глубокой резцовой дизокклюзией. Основные жалобы эти больные предъявляли по поводу эстетических нарушений, связанных с различной степенью выраженности аномалий и деформацией зубных рядов, затрудняющих протезирование дефектов, обусловленных отсутствием отдельных зубов или их групп.

Для пациентов были характерны лицевые признаки имеющейся аномалии. Результаты морфометрического исследования показали изменения параметров лица после протетического лечения.

Следует отметить, что протетическое лечение изменило морфометрические параметры, однако отличие по большинству из них было не достоверным. В среднем на 2–3 мм увеличилось межгнатическое расстояние, что привело к незначительному увеличению высоты гнатической части лица, которое было значительно меньше, чем у лиц с физиологической окклюзией и достоверно меньше, чем у пациентов 2 группы 1 подгруппы.

В результате комплексного лечения было достигнуто функциональное и эстетическое улучшение челюстно-лицевой области, однако не достигало значения нормальных величин, и отмечалась выраженность супраментальной и носогубных складок.

Определяемое методом окклюзографии состояние окклюзионных взаимоотношений зубных рядов, выявило недостаточное количество площадок смыкания окклюзионных поверхностей до лечения и их увеличение после ортопедического лечения.

Средние показатели жевательной эффективности у пациентов, прошедших лечение улучшились за счет изготовления протетических конструкций.

Результаты миотонометрии показали, что тонус покоя височных мышц после ортопедического лечения и адаптации к протетическим конструкциям практически не изменился, а тонус напряжения увеличивался.

Для иллюстрации эффективности протетического лечения приводим выписку из истории болезни № 278 пациентки О. 35 лет, которая с жалобами на затрудненное откусывание и пережевывание пищи, подвижность зубов, эстетический вид (рис. 1).

Характерными лицевыми признаками в данном случае было уменьшение вертикальных размеров лица, особенно гнатической части, выраженность супраментальной и носогубных складок, увеличение расстояния между краями губ.

Высота нижней трети лица (sn — gn) составляла 53,5 мм, причем высота от субспинальной точки (sn)



Рис. 1. Фотографии полости рта пациентки О. 35 лет. Снижение высоты прикуса

до линии смыкания губ (точка sto) была 19,9 мм, а высота от линии смыкания губ до подбородочной точки (gn) — 33,8 мм. Расстояние между зрачками (p — p) составляло 67,2 мм, между внутренними углами глаз (en — en) — 32,7 мм, между наружными углами глаз (ex — ex) — 101,8мм.

Высота носа (n — prn) была 49,9 мм, а ширина между крыльями носа (an — an) 42,1 мм. Ширина рта между точками (ch — ch) составляла 83,4 мм, а ширина нижней челюсти между точками (go — go) — 116,7 мм.

Анализ телерентгенограммы по Schwarz показал, что лицевой угол (ANSe) составлял 88°, угол инклинации был 81°, угол ANB — 4°

Результаты исследования показали, что высота верхнего отдела лица (n — sn) не соответствовала нижней части лица (sn — gn) и разница в этих показателях составляла 8,5 мм.

Обращает на себя внимание, что высота зубоальвелярной части верхней челюсти (sn — inc) также не соответствовала зубоальвеолярной части нижней челюсти (inc — spm). Высота межгнатической части (sn — spm) была уменьшена при смыкании челюстей. Характерно уменьшение гнатической части верхней и нижней челюсти, что способствовало лицевым признакам патологии.

Угол нижней челюсти был 124 градуса, а гонильный угол составлял всего 16 градусов, что было обусловлено снижением гнатической части лица.

Результаты анализа по Di Paolo показали, что длина верхней челюсти (A'M') составляла 53,6 мм, а нижней челюсти (B'J') — 52,8 мм. Высота A'B' была 61,5 мм, а M'J' — 42,6 мм.

Результаты исследования височно-нижнечелюстного сустава показали, что у пациентки положение головки нижней челюсти в височно-нижнечелюстной ямке не соответствовало её нормальному положению, суставная щель в переднем (D1) отделе составляла 3.5 мм, верхнем (D3) отделе была 5,0 мм, а в заднем отделе (D4) была меньше нормы и составляла 1,2 мм. При этом расстояние A-B составляло 18,6 мм, а угол ската суставного бугорка был 45 градусов. Таким образом, в результате проведенных исследований определена глубокая резцовая дизокклюзия с уменьшением высоты гнатической части лица.

При анализе окклюзограммы выявлены всего 4 площадки смыкания нетипичного расположения. Практически отсутствовала возможность пережевывания и откусывания пищи. Протетическое лечение преследовало следующие цели: нормализацию формы зубных рядов, коррекцию окклюзионных взаимоотношений, достижение эстетического и функционального оптимума челюстно-лицевой области.

Пациентке были изготовлены металлокерамические несъёмные протезы с опорой на внутрикостные дентальные имплантаты для замещения дефектов зубных дуг в переднем сегменте и установлены замковые крепления для съёмных конструкций, замещающих дефекты в боковых отделах (рис. 2).



Рис. 2. Фотография полости рта пациентки О. После протетического лечения

Эффективность жевания увеличилась с 21,1+0,9 % до 74,2+1,2 %. Время жевания до лечения составляло 59,2 + 3,4 секунд, после ортопедического лечения и субъективной адаптации к протезам, сокращалось до 31,6 + 0,8 секунд.

При анализе томограмм височно-нижнечелюстных суставов в до лечения мы выявляли нарушения нормальных топографических соотношений элементов этого сочленения. Суставные головки нижней челюсти были

смещены дистально кверху, отмечалось расширение суставной щели в переднем отделе и сужение ее в заднее-верхнем отделе. После лечения существенных изменений в положении суставных головок мы не отмечали.

Функциограмма пациентки О. после протетического лечения представлена на рис. 3.

Необходимо отметить, что после протетического лечения были выявлены отклонения от нормы готического угла. Изменения готического угла проявлялись нарушением симметричности сторон, сглаженностью вершин и несоответствием их срединно-сагиттальной линии металлической пластинки и модели нижней челюсти.

Заключение

Таким образом, проведенное лечение принесло значительный эффект и улучшило функциональные и эстетические показатели. Улучшился внешний вид пациентки, выровнялся центр между зубными дугами, нормализовались окклюзионные взаимоотношения. В то же время лицевые признаки патологической окклюзии



Рис. 3. Функциограмма пациентки О. после лечения

сохранялись, не восстанавливалась высота перекрытия резцов, сохранялось нарушение движений нижней челюсти, что было обусловлено выраженностью основной патологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агашина М.А, Балахничев Д.Н, Фищев С.Б, Лепилин А.В, Дмитриенко С.В. Особенности параметров зубных дуг в двух плоскостях с учётом диагональных параметров. Стоматология детского возраста и профилактика. 2016;15(4):61–63. Available from: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27511472
2. Берёзкина Т.Н., Фищев С.Б., Севастьянов А.В., Рожкова М.Г. и др. Лечение дистопии клыка верхней челюсти применением микроимпланта и брекет-системы: клинический случай. Проблемы стоматологии. 2025; 21(2):131–137. doi: 10.18481/2077–7566-2025-21-2-131-137
3. Кондратюк А.А, Фищев С.Б, Фомин И.В, Субботин Р.С, Лепилин А.В. Особенности торка медиальных резцов у людей с различными типами зубных дуг, по результатам анализа конусно-лучевых компьютерных томограмм. Стоматология детского возраста и профилактика. 2019;19(1):40–45. doi:10.35630/2199-885X/2018/8/1/19
4. Малыгин Ю.М., Тайбогарова С.С., Малыгин М.Ю., Велиева Н.И. Значение строения альвеолярных дуг для дифференциальной диагностики дистального прикуса. Ортодонтия. 2014;(3):10–14. Available from: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23288228
5. Огир Е.С., Персин Л.С., Панкратова Н.В., Кузнецова Т.Е., Пронина К.С. Значения биопотенциалов височных и жевательных мышц при различных видах окклюзионной нагрузки у детей 7–12 лет с физиологической и дистальной окклюзией. Ортодонтия. 2013;(3):19–25. Available from: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22926259
6. Павлова С.Г., Климов А.Г., Севастьянов А.В., Рожкова М.Г., Пуздырева М.Н. и др. Особенности ортодонтического лечения пациентов с зубоальвеолярной формой глубокой резцовой дизокклюзии: клинический случай. Институт стоматологии. 2025;106(1):58–60. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82343036
7. Рожкова М.Г., Фищев С.Б., Климов А.Г., Севастьянов А.В. и др. Особенности диагностики и ортодонтического лечения подростков с зубоальвеолярной формой дистальной окклюзии. Стоматология детского возраста и профилактика 2024; 24(3);313–319. DOI: 10.33925/1683-3031-2024-839.
8. Севастьянов А.В., Березкина Т.Н., Фищев С.Б., Павлова С.Г., Пуздырева М.Н. и др. Изменения морфометрических параметров у пациентов с глубокой резцовой дизокклюзией и уменьшением высоты гнатической части лица в процессе ортодонтического лечения // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики: Серия: Естественные и технические науки. — 2025; №10–2, — с.122–126. DOI 10.37882/2223-2966.2025.10-2.18
9. Baeshen H. The Prevalence of Major Types of Occlusion Anomalies among Saudi Middle School Students // J. Contemp. Dent. 2017; 18(2):142–146. doi: 10.5005/jp-journals-10024-2005. DOI 10.5005/jp-journals-10024-2005
10. Botticelli S., Küseler A., Marcusson A., Mølsted K., Nørholt S.E., Cattaneo P.M., et al. Do infant cleft dimensions have an influence on occlusal relations? A subgroup analysis within an RCT of primary surgery in patients with unilateral cleft lip and palate. Cleft Palate Craniofac J. 2020;57(3):378–388. doi: 10.1177/1055665619875320.
11. Sherrard J.F., Rossouw P.E., Benson B.W., Carrillo R., Buschang PH. Accuracy and reliability of tooth and root lengths measured on cone-beam computed tomographs. Am J Orthod Dentofac Orthop. 2010;137(4):100–108. doi: 10.1016/j.ajodo.2009.03.040.

© Рожкова Мария Геннадьевна (rozmaria2010@yandex.ru); Березкина Татьяна Николаевна (mail332@mail.ru);
Фищев Сергей Борисович (super.kant@yandex.ru); Севастьянов Аркадий Владимирович (ardy.dkr@mail.ru);
Павлова Светлана Георгиевна (svetap_75@mail.ru); Пуздырева Маргарита Николаевна (seven-spb@yandex.ru);
Шторина Анастасия Александровна (nastiya78@mail.ru); Орлова Ирина Викторовна (orisha@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.36

ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННАЯ ОЦЕНКА ТОЛЕРАНТНОСТИ К ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ У ПАЦИЕНТОВ С ОСТРЫМ КОРОНАРНЫМ СИНДРОМОМ ПОСЛЕ ЭНДОВАСКУЛЯРНОЙ РЕВАСКУЛЯРИЗАЦИИ НА СТАЦИОНАРНОМ ЭТАПЕ КАРДИОРЕАБИЛИТАЦИИ

PERSONALIZED ASSESSMENT OF EXERCISE TOLERANCE IN PATIENTS WITH ACUTE CORONARY SYNDROME AFTER ENDOVASCULAR REVASCULARIZATION AT THE INPATIENT STAGE OF CARDIAC REHABILITATION

E. Rybin
A. Obrezan

Summary. Coronary heart disease remains one of the most significant diseases in the Russian Federation, and methods of endovascular myocardial revascularization are currently the main ones in the treatment of acute coronary syndrome. The effectiveness of revascularization largely depends on the quality and completeness of subsequent rehabilitation measures, which should be applied to each patient if there is a rehabilitation potential. Patients with acute coronary syndrome admitted to the hospital are extremely heterogeneous in terms of clinical and anamnestic data, laboratory, and instrumental indicators of impaired functioning of the cardiovascular system, and the amount of myocardial revascularization performed, which requires a personalized approach and assessment of functional parameters in the process of planning effective and safe rehabilitation methods. The aim of the study was to evaluate exercise tolerance in patients with acute coronary syndrome after endovascular revascularization with different contractile function of the left ventricle during exercise tests. Before the end of the inpatient stage of cardiorehabilitation, patients were selected for exercise tests (a symptom of limited cycling ergometry and a six-minute walking test with an assessment of the subjective intensity of physical activity and severity of shortness of breath according to Borg). According to the results of stress tests in groups with different left ventricular ejection fraction, the exercise tolerance level was stratified. Differences in the tolerance of physical activity by patients of different groups were revealed, which led to significant differences in the distribution of exercise tolerance levels. Personalized assessment of exercise tolerance in the process of cardiorehabilitation of patients with acute coronary syndrome after endovascular revascularization is the basis for the formation of individual intensity and duration of physical training at all stages, which contributes to improving the effectiveness of rehabilitation of patients with coronary heart disease. The results of the work are aimed at improving the system of physical rehabilitation of patients after revascularizing surgical interventions and can be applied to solve the important socio-economic task of restoring patients' ability to work.

Рыбин Евгений Владимирович
Кандидат медицинских наук, СПБ ГБУЗ Городская больница Святой преподобномученицы Елизаветы
doctorrybin@mail.ru
Обрезан Андрей Григорьевич
Доктор медицинских наук, профессор, ФГОУ ВПО Санкт-Петербургский Государственный Университет; Группа компаний Мой медицинский центр, г. Санкт-Петербург
obrezan1@yandex.ru

Аннотация. Ишемическая болезнь сердца остается одним из наиболее значимых заболеваний в Российской Федерации, а методы эндоваскулярной реваскуляризации миокарда в настоящее время являются основными в лечении острого коронарного синдрома (ОКС). Эффективность же проведенной реваскуляризации во многом зависит от качества и полноты последующих реабилитационных мероприятий, которые должны применяться к каждому пациенту при наличии реабилитационного потенциала. Пациенты с острым коронарным синдромом, поступающие в стационар крайне неоднородны по клинико-анамнестическим данным, лабораторным и инструментальным показателям нарушения работы сердечно-сосудистой системы, объему проведенной реваскуляризации миокарда, что в процессе планирования эффективных и безопасных реабилитационных методик требует персонализированного подхода и оценки функциональных показателей. Целью исследования являлась оценка толерантности к физической нагрузке (ТФН) у пациентов с острым коронарным синдромом после эндоваскулярной реваскуляризации с различной сократительной функцией левого желудочка при проведении нагрузочных проб. Перед окончанием стационарного этапа кардиореабилитации проводили отбор пациентов для проведения нагрузочных проб (симптом-лимитированной велоэргометрии и теста с шестиминутной ходьбой с оценкой субъективной интенсивности физической нагрузки и выраженности одышки по Боргу). По результатам нагрузочных проб в группах с различной фракцией выброса левого желудочка выполнена стратификация по уровню ТФН. Выявлены различия переносимости физической нагрузки пациентами разных групп, что обусловило значимые различия в распределении по уровню ТФН. Персонализированная оценка ТФН в процессе кардиореабилитации пациентов с ОКС после эндоваскулярной реваскуляризации, является основой для формирования индивидуальных по интенсивности и продолжительности физических тренировок на всех этапах, что способствует повышению эффективности реабилитации пациентов с ишемической болезнью сердца. Результаты работы направлены на совершенствование системы физической реабилитации пациентов после реваскуляризирующих оперативных вмешательств и могут быть применены для решения важной социально-экономической задачи восстановления трудоспособности пациентов.

Keywords: acute coronary syndrome, exercise tolerance, endovascular myocardial revascularization, six-minute walking test, bicycle ergometry, personalized cardiac rehabilitation.

Ключевые слова: острый коронарный синдром, толерантность к физической нагрузке, эндоваскулярная реваскуляризация миокарда, тест с шестиминутной ходьбой, велоэргометрия, персонализированная кардиореабилитация.

Введение

В Российской Федерации на протяжении последних десятилетий болезни системы кровообращения остаются значимой медицинской и социально-экономической проблемой в связи с высокой летальностью и инвалидизации пациентов. Ишемическая болезнь сердца (ИБС) преобладает в структуре заболеваемости и смертности от болезней системы кровообращения. При этом очень высокими остаются показатели смертности от ИБС, несмотря на серьезные мероприятия по улучшению доступности и качества лечения, в том числе, эндоваскулярной реваскуляризации при остром коронарном синдроме. Это обусловливает высокую актуальность разработки современных ранних реабилитационных мероприятий, а также определения факторов, характеризующих переносимость оказываемых воздействий [1, с. 105]. С позиции современных знаний «золотым стандартом» лечения пациентов с острый коронарным синдромом (ОКС) является сочетанное применение высокотехнологичных возможностей рентгенэндоваскулярной хирургии и современной фармакологической поддержки как в предоперационном периоде, так и во время чрескожного коронарного вмешательства (ЧКВ) [2, с. 46].

Практически все пациенты с ОКС после эндоваскулярной реваскуляризации миокарда при отсутствии осложнений, наличии реабилитационного потенциала нуждаются в проведении этапной кардиореабилитации для восстановления трудоспособности. Реабилитация является важным дополнением вторичной профилактики [3 с. 43] Однако, пациенты при ОКС и реваскуляризирующих оперативных вмешательств представляют крайне неоднородную группу по состоянию сердечно-сосудистой системы, объему и виду реваскуляризации, сопутствующей соматической патологии, что требует персонализированного подхода к составлению и прогнозированию программ кардиореабилитации (КР) на стационарном этапе [5, с.16].

Прогнозирование построения персонализированных программ кардиореабилитации на основании различной ТФН, у пациентов с разной степенью реваскуляризации миокарда и сократительной функцией левого желудочка, будет основой рекомендаций по раннему проведению эффективной физической реабилитации после эндоваскулярной реваскуляризации, которая безусловно будут определять успешность реабилитационных мероприятий на последующих этапах для восстановления здоровья и трудоспособности пациентов, а также снижения рисков повторных коронарных событий.

Правильно построенная программа физической и психологической реабилитации, основанная на индивидуальной оценке возраста, исходном уровне активности и физических ограничений способствует повышению приверженности к медикаментозному лечению и мероприятиям вторичной профилактики ИБС. После определения индивидуальной переносимости физической нагрузки и оценки связанного с ней риска рекомендуется разработать программу реабилитации [5, с. 201].

Толерантность к физической нагрузке является суммарным показателем физиологических возможностей организма, позволяющей оценить функциональное состояние сердечно-сосудистой системы. Оценка ТФН является обязательной при проведении программ КР [7, с 21]. Оценка переносимости физической нагрузки (ФН) в процессе реабилитационных мероприятий является одним из главных критериев эффективности реабилитации кардиологических пациентов. Программа физической активизации пациента после реваскуляризирующих вмешательств должна составляться с учетом переносимости ФН, определенной с помощью нагрузочных проб на каждом этапе реабилитации и преемственности к предшествующему этапу реабилитации, что позволяет персонализировано подобрать безопасные и эффективные режимы физических тренировок на последующих этапах лечения, ускорить восстановление трудоспособности пациентов [7, с. 23].

Нагрузочное тестирование — ключевой момент в оценке ТФН пациентов в системе КР. Проведение нагрузочных проб перед включением в программы физических тренировок позволяет определить реакцию пациента на физическую нагрузку, осуществить подбор интенсивности тренирующей нагрузки, основанный на максимальной пользе и безопасности, а также корректировать нагрузку при увеличении тренированности. Оценка изменений ТФН после завершения программы физической реабилитации на каждом этапе дает информацию о клинической эффективности для пациента [8, с 103].

Пациенты с ОКС после эндоваскулярной реваскуляризации миокарда имеют различную систолическую функцию левого желудочка, что во многом определяет

ТФН после стационарного этапа КР, которая определяет подбор индивидуальных эффективных и безопасных программ персонализированной физической реабилитации.

Цель исследования

Оценка ТФН у пациентов с ОКС после эндоваскулярной реваскуляризации с различной сократительной функцией левого желудочка при проведении нагрузочных проб на стационарном этапе кардиореабилитации.

Материалы и методы

Обследовано 206 пациента, поступивших экстренно с острым коронарным синдромом в СПб ГБУЗ «Елизаветинская больница» в 2025 году. ОКС с подъемом сегмента ST (ОКСпST) — 113 пациентов (54,9 %), ОКС без подъема сегмента ST (ОКСбпST) — 93 пациента (45,1 %). Средний возраст составил 59,2±9,6 лет., пациенты мужского пола преобладали — 147 (71,4 %). Все пациенты госпитализированы, подписано информированное добровольное согласие. Выполнена эндоваскулярная реваскуляризация методом ангиопластики и стентирования коронарных артерий. Средняя продолжительность стационарного лечения составила 10,9±2,9 дня.

При поступлении пациентам выполнена трансторакальная эзокардиография на УЗ сканере экспертного класса для оценки фракции выброса левого желудочка (ФВ ЛЖ). Пациенты были разделены на группы: 1 группа — с сохраненной ФВ ЛЖ (≥50% по Симпсону) — 133 пациента (64,6 %) 2 группа — с умеренно сниженной ФВ ЛЖ (40–49 % по Симпсону) — 73 пациента (35,4 %). После проведения эндоваскулярной реваскуляризации миокарда пациентам проводилась интенсивная терапия в кардиореанимации. При стабилизации состояния, выполнения контрольных лабораторных показателей, проведения инструментальных исследований и, при наличии соматической патологии, консультаций специалистов, пациенты переводились в кардиологические отделения. В отделении пациенты получали весь необходимый объем медикаментозного лечения, диагностических исследований при наличии сопутствующей соматической патологии, проводился стационарный этап кардиореабилитации согласно клиническим рекомендациям и критериям качества оказания медицинской помощи при ОКС и остром инфаркте миокарда (ОИМ).

Для выбора тактики в процессе ранней КР у пациентов, перенесших эндоваскулярную реваскуляризацию, применялась реабилитационная классификация степени тяжести клинического состояния больных ОИМ (Аронов Д.М., 1983; модификация 2014) [7, с. 15]. Перед проведением нагрузочных проб для определения ТФН отбирали пациентов только легкой и средней группы тяжести ОИМ по реабилитационной классификации, имеющих средний и высокий реабилитационный потенциал, при отсутствии абсолютных противопоказаний к физической нагрузке (стенокардия высокого функционального класса, сердечная недостаточностью III–IV ф. к. по NYHA, постинфарктная аневризма левого желудочка, тромбы в камерах сердца, гемодинамически значимые нарушения сердечного ритма и проводимости, синкопальные состояния, неконтролируемая артериальная гипертензия, неадекватная гемодинамическая реакция на физическую нагрузку).

Перед выпиской из стационара, переводом в стационарное отделение реабилитации или специализированный санаторий, что, в соответствии с клиническими рекомендациями соответствовало 9–10 и более суткам после вмешательства, пациентам выполняли тест с шестиминутной ходьбой (ТШХ) по стандартной методике [8 с. 103, 9 с. 110] и велоэргометрию (ВЭМ) (симптом-лимитированный нагрузочный тест) на вертикальном велоэргометре [10 с. 25, 11 с. 9–24]. Результаты нагрузочных тестов пациентов фиксировали в формализованной карте. Для субъективной оценки восприятия пациентами интенсивности выполняемой ФН и оценки выраженности одышки при проведении ТШХ использовалась модифицированная шкала Борга (Borg CR10 — Category Ratio scale) [12 с. 27].

Стратификация пациентов по уровню ТФН, исходя из результатов нагрузочных проб — ТШХ и ВЭМ, проводилось по рекомендуемой методике [13 с. 77, 14 с. 12] с дополнительной оценкой субъективной переносимости ФН и выраженность одышки по шкале Борга.

Статистический анализ результатов проводили с помощью программного комплекса IBM SPSS Statistics 25. Количественные признаки представлены в виде «среднее значение ± стандартное отклонение (SD)». Оценка нормальности распределения проводилась с помощью теста Колмогорова-Смирнова. Для оценки различий в группах использовали параметрические тесты (t-тест Стьюдента для независимых и зависимых выборок). Критическое значение уровня значимости было принято равным 5 % ($p < 0,05$).

Результаты и обсуждение

Анализ результатов показали, что нагрузочные тесты, выполненные в ранние сроки пациентов с ОКС, являются безопасным функциональным методом оценки ТФН на стационарном этапе КР при выписке из стационара. Все обследуемые пациенты с ОКС после эндоваскулярной реваскуляризации выполнили ТШХ без клинических признаков нарастающей сердечной и коронарной недостаточности. При раннем проведении ВЭМ нежелательные события были зарегистрированы у 16 пациентов

(7,8 %), которые не имели характера серьезных нежелательных событий. При этом сами события (стенокардии напряжения, гипотензия и неадекватная реакция на нагрузку, преходящее нарушение сердечного ритма) которые, с наибольшей вероятностью, были связаны с ФН как таковой и не потребовали неотложной помощи, коррекции терапии, продлению сроков текущей госпитализации, то есть не имели характера серьезных нежелательных событий.

Результаты ТШХ в группах с различной (1 группа — с сохраненной ФВ ЛЖ, 2 группа — с умеренно сниженной ФВ ЛЖ) представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты ТШХ у пациентов в исследуемых группах

Группа пациентов	Пройденная дистанция, м M±SD	Интенсивность нагрузки (шкала Борга) M±SD	Выраженность одышки (шкала Борга) M±SD
1 Группа	367,1±42,3	2,2±0,3	1,9±0,4
2 Группа	265,8±39,8*	3,2±0,4*	3,4±0,6*

Примечание: * — p <0,05

Полученные данных результатов нагрузочного теста позволяют выявить значимые различия у пациентов с различной систолической функцией ЛЖ. При проведении ТШХ пациенты с умеренно сниженной ФВ ЛЖ за определенное время проходили в среднем темпе значимо меньшую дистанцию при субъективном восприятии нагрузки как более тяжелой и с большей выраженностью одышки при выполнении физической нагрузки.

Аналогичные результаты, демонстрирующие различия в показателях нагрузочной пробы у пациентов с разной сократительной функцией ЛЖ у пациентов с ОКС, были выявлены и при проведении ВЭМ (таблица 2).

Таблица 2.

Результаты ВЭМ у пациентов в исследуемых группах

Группа пациентов	Максимальная нагрузка, Вт M±SD	Время выполнения нагрузки, мин M±SD	Максимальная ЧСС при ВЭМ, уд/мин M±SD	Пороговая мощность, Вт/кг M±SD
1 Группа	96,9±19,3	10,8±0,5	113,8±17,1	1,4±0,3
2 Группа	56,4±15,5*	6,8±0,6*	100,1±16,6	0,7±0,3*

Примечание: * — p <0,05

Пациенты с сохраненной ФВ ЛЖ в сравнении с пациентами с умеренно сниженной ФВ ЛЖ выполняли более интенсивную нагрузку при проведении ВЭМ (96,9±19,3 Вт против 56,4±15,5*, p=0,022) в течение более длительного времени (10,8±0,5 мин против 6,8±0,6* мин, p < 0,05) с большим приростом ЧСС.

Различия показателей выполненных нагрузочных проб, проведенных пациентам с ОКС после эндоваскулярной реваскуляризации, позволили стратифицировать пациентов по уровню ТФН (таблица 3). Более половины (67,4 %) пациентов с сохраненной сократительной функцией ЛЖ имели высокую и среднюю ТФН, в группе с умеренно сниженной ФВ ЛЖ у большинства (67,1 %) пациентов ТФН характеризовалась как низкая.

Таблица 3.

Стратификация пациентов с различной ФВ ЛЖ по уровню ТФН

Группа пациентов	Толерантность к физической нагрузке			Всего
	Высокая	Средняя	Низкая	
1 Группа	30 (22,6 %)	53 (39,8 %)	50 (37,6 %)	133
2 Группа	5 (6,9 %)	19 (26 %)	49 (67,1 %)	73

Таким образом, персонализированная оценка ТФН, основанная на различной систолической функции ЛЖ у пациентов с ОКС после эндоваскулярной реваскуляризации на стационарном этапе КР выявила различия в уровне ТФН на основании результатов нагрузочных проб, проведенных при выписке пациентов, переводе в отделение соматической реабилитации или специализированный санаторий.

Заключение

Нагрузочные пробы пациентам с ОКС после эндоваскулярной реваскуляризации являются безопасным функциональным методом оценки состояния сердечно-сосудистой системы и оценки ТФН на всех этапах физической реабилитации. Персонализированная оценка ТФН при различной систолической функции ЛЖ при ОКС является основой для применения безопасных и эффективных реабилитационных технологий, индивидуальных физических тренировок на амбулаторном этапе. Эффективная реабилитация после реваскуляризирующих оперативных вмешательств будет способствовать восстановлению трудоспособности и улучшению качества жизни пациентов, а также вносить значимый вклад в решение важной социально-экономической задачи здравоохранения Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аронов Д.М. Основы кардиореабилитации // Кардиология: Новости. Мнения. Обучение. — 2016. — № 3. — С. 104–110. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/osnovy-kardioreabilitatsii.
2. Черняев М.В., Файбушевич А.Г., Музганова Ю.С. Эндоваскулярное лечение больных с острым коронарным синдромом с использованием стентов с лимусвыделяющим покрытием. Журнал им. Н.В. Склифосовского «Неотложная медицинская помощь». 2019;8(1):45-52. DOI:10.23934/2223–9022-2019-8-1-45–52.
3. Аронов Д.М. Новые подходы к реабилитации и вторичной профилактике у больных, перенесших острый инфаркт миокарда с подъемом сегмента ST электрокардиограммы / Д.М. Аронов, М.Г. Бубнова, В.Б. Красницкий // Кардиология. — 2015. — Т. 55, № 12. — С. 125–132. DOI 10.18565/cardio.2015.12.125-132. — EDN VDZZUZ.
4. Бубнова М.Г., Аронов Д.М. Кардиореабилитация: этапы, принципы и международная классификация функционирования (МКФ). Профилактическая медицина. 2020;23(5):40–49. DOI:10.17116/profmed20202305140
5. Рыбин Е.В., Плескачев К.В., Евстюхина А.К., Галенко А.С. Подходы к ранней персонализированной кардиореабилитации пациентов с ишемической болезнью сердца после реваскуляризации // Juvenis Scientia. 2025; 11(4):13–23 DOI: 10.32415/jscientia_2025_11_4_13-23.
6. Барбараш О.Л., Карпов Ю.А., Панов А.В. и др. Стабильная ишемическая болезнь сердца. Клинические рекомендации 2024. Российский кардиологический журнал. 2024;29(9):6110 https://doi.org/10.15829/1560-4071-2024-6110. EDN: HHJJUT
7. Бубнова М.Г., Барбараш О.Л., Долецкий А.А. и др. Острый инфаркт миокарда с подъемом сегмента ST электрокардиограммы: реабилитация и вторичная профилактика. Российский кардиологический журнал. 2015;(1):6–52. DOI: https://doi.org/10.15829/1560-4071-2015-1-6-52.
8. Бубнова М.Г., Персиянова-Дуброва А.Л. Применение теста с шестиминутной ходьбой в кардиореабилитации. Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2020;19(4):2561. https://doi.org/10.15829/1728-8800-2020-2561.
9. Будневский А.В., Кравченко А.Я., Токмачев Р.Е., Черник Т.А., Токмачев Е.В., Летникова Ю.Б. Диагностические, прогностические и терапевтические возможности использования теста 6-минутной ходьбы у пациентов с хронической сердечной недостаточностью. Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2020;19(6):2460. DOI: https://doi.org/10.15829/1728-8800-2020-2460.
10. Ребров Б.А., Реброва О.А., Благодаренко А.Б., Блудова Н.Г. Практические подходы к проведению теста с физической нагрузкой. Медицинский вестник Юга России. 2021; 12(2):22–27. DOI 10.21886/2219–8075-2021-12-2-22–27.
11. Тавровская Т.В. Велоэргометрия. Практическое пособие для врачей. СПб.: Нео, 2007. 138 с.
12. Бокерия Л.А., Аронов Д.М. Российские клинические рекомендации Коронарное шунтирование больных ишемической болезнью сердца: реабилитация и вторичная профилактика // CardioСоматика. — 2016; 7 (3–4):5–71. DOI: 10.26442/CS45210.
13. Драпкина О.М., Новикова Н.К., Джиоева О.Н. Методические рекомендации: «Современные возможности и перспективы комплексной физической активности больных с сердечно-сосудистой патологией». Профилактическая медицина. 2020. — Т. 23. — № 3. — С. 61–119. DOI: 10.17116/profmed20202303261.
14. Довгалюк Ю.В., Мишина И.Е., Чистякова Ю.В. Динамика толерантности к физической нагрузке в оценке эффективности программ реабилитации больных, перенесших острый коронарный синдром, на амбулаторном этапе // Вестник восстановительной медицины. 2019; 3–91:11–14. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-tolerantnosti-k-fizicheskoy-nagruzke-v-otsenke-effektivnosti-programm-reabilitatsii-bolnyh-perenesshih-ostryy-koronarnyy.

© Рыбин Евгений Владимирович (doctorrybin@mail.ru); Обрезан Андрей Григорьевич (obrezan1@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.37

ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕХАНО-ТЕРМИЧЕСКИХ ПОРАЖЕНИЙ

FEATURES OF THE COURSE OF COMBINED MECHANICAL AND THERMAL LESIONS

I. Savinkov

Summary. This article highlights some of the features of the course of such individual types of wounds as «combined mechanical and thermal lesions». The wounded, who suffered simultaneous mechanical and thermal injuries, are among the most difficult cases among the victims. The fact of a relatively high proportion of wounded in the first year of a special military operation highlights the likelihood of an increase in the number of such incidents in the future. The methodology of this study uses a retrospective analysis of information from the medical records of patients treated in the anesthesiological and intensive care units. The study defined criteria for a sample of participants, including patients with thermal and mechanical injuries, in isolation or in combination. The structure of patients treated in the Department of Anesthesiology and intensive care in the period 2014-2022 was analyzed. Despite the abundance of classifications of isolated injuries, which make it possible to determine their severity and predict the outcome, this remains an unresolved problem for combined mechanical and thermal injury. To solve it, the key task is to study the manifestations of mutually aggravating factors by comparative analysis of the course of isolated burn, mechanical and combined injuries. A comparative analysis of medical histories revealed manifestations of the phenomenon of mutual aggravation in groups of victims with combined mechanical and thermal lesions with severe, extremely severe, and critical burns.

Keywords: combined lesions, wounds, thermal lesions, combined mechanical and thermal lesions, mutual aggravation syndrome.

Савинков Игорь Юрьевич
Адъюнкт, Федеральное Государственное Бюджетное Военное Образовательное Учреждение Высшего Образования Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова, г. Санкт-Петербург
igorsavinkov@yandex.ru

Аннотация. Данная статья освещает некоторые особенности течения таких отдельных видов ранений как «комбинированные механо-термические поражения». Раненые, подвергшиеся одновременным механическим и тепловым травмам, относятся к наиболее сложным случаям среди пострадавших. Факт сравнительно высокой доли раненых подчеркивает вероятность увеличения количества таких инцидентов в дальнейшем. В методологии данного исследования применен ретроспективный анализ информации историй болезни пациентов, получивших лечение в анестезиологическом и реанимационном отделении. Исследование определило критерии для выборки участников, включая пациентов с термическими и механическими повреждениями, изолированно или в комбинации. Была проанализирована структура пациентов, проходивших лечение в отделении анестезиологии и реанимации в период 2014–2022 год. Несмотря на обилие классификаций изолированных травм, позволяющих определять их тяжесть и прогнозировать исход, для комбинированной механо-термической травмы это остается нерешенной проблемой. Для ее решения ключевой задачей является исследование проявлений взаимоотягощающих факторов путем сравнительного анализа течения изолированных ожоговой, механической и комбинированных травм. Сравнительный анализ историй болезни позволил обнаружить проявления феномена взаимного отягощения в группах пострадавших с комбинированными механо-термическими поражениями с тяжёлыми, крайне тяжёлыми и критическими ожогами.

Ключевые слова: комбинированные поражения, ранения, термические поражения, комбинированные механо-термические поражения, синдром взаимного отягощения.

Актуальность темы

Существует аналитика, согласно которой в последнее десятилетия зафиксировано максимальное количество вооруженных конфликтов во всем мире, а именно более 180 горячих точек, в том числе всемирно освещаемых по всем информационным источникам.

Термин «комбинированные поражения» описывает патологические изменения в организме, вызванные совместным действием нескольких видов поражений от вариативного оружия. Исследования и работы расширили применение этого понятия, включив в него разнообразные комбинации травм различной этиологии, полученные в результате воздействия на человеческий организм различных травмирующих факторов [4]. Раненые, подвергшиеся одновременным механическим и тепловым травмам, относятся к наиболее сложным случаям среди пострадавших, причём их доля достигает 10 % среди жертв, получивших ранения в результате взрывов [6,9].

Современные высокоточные ракетно-артиллерийские боеприпасы способствуют термическим поражениям различной степени тяжести, в том числе вызывая ожоги дыхательных путей [3].

В контексте нынешних военных конфликтов доля ожогов среди всех видов боевых ранений колеблется от 1,5 % до 4 % [5]. Это указывает на значимость ожого-

вых поражений в общей структуре боевых травм, выделяя их как серьезную проблему современной военной медицины, требующую специализированных методов лечения и реабилитации.

Факт сравнительно высокой доли раненых в первый год специальной военной операции подчеркивает вероятность увеличения количества таких инцидентов в дальнейшем [10].

В текущей обстановке ведения военных действий, характеризующейся обширным применением артиллерии, включая применение высокоточных и кассетных боеприпасов через системы залпового огня и активное использование дронов, процедуры оказания немедленной медицинской помощи переходят в фазу подготовки к эвакуации. Целью этой фазы является максимально быстрая эвакуация пострадавших в условия, где доступна более квалифицированная и целенаправленная медицинская поддержка [8].

В сфере полевой медицины проблематика выполнения полноценной диагностики и своевременной эвакуации пострадавших с комбинированными механо-термическими травмами ставит перед специалистами серьезные вызовы. Ситуация усложняется при обширных ожогах, где скорая и эффективная эвакуация становится жизненно важной [1].

Анализ комбинированных механо-термических повреждений (КМТП) указывает на срочную потребность в пересмотре традиционных методик лечения. Врачи часто подчеркивают важность выбора специалиста, основываясь на преобладающем аспекте травмы [7]. Игнорирование многогранности КМТП и неучет долговременных потребностей в реабилитации и восстановлении может существенно снизить эффективность терапии [2].

В методологии данного исследования применен ретроспективный анализ информации историй болезни 268 пациентов, получивших лечение в анестезиологическом и реанимационном отделении за предыдущие три года. Исследование определило критерии для выборки участников, включая пациентов с термическими и механическими повреждениями, изолированно или в комбинации. Были сформированы десять групп для сопоставительного анализа, базирующиеся на степени тяжести термических повреждений. Для обеспечения статистической сопоставимости групп учитывали возраст участников, общую и площадь глубокого ожога, а также длительность периода от момента получения травмы до поступления в специализированное лечебное учреждение. (Таблица 1).

Для оценки степени тяжести полученных травм и выявления эффекта их взаимного усугубления были выбраны интегральные показатели: продолжительность пребывания пострадавших и показатели смертности в группах (Таблица 2).

Статистический анализ данных, полученных в ходе исследования

Была проведена сравнительная оценка групп пациентов, пострадавших от ожогов, с учетом одинаковой степени тяжести, выраженной через вероятность летального исхода (ВЛИ).

Таблица 1.

Сравнение по однородности

№ группы	Количество пораженных в группе, чел.	Площадь поверхностного ожога, % п.т.	Площадь глубокого ожога, % п.т.	Возраст, лет	Срок поступления с момента травмы, сут.	Тяжесть травмы (по ВЛИ)
1	6	13,5±8	3,2±3	26±5	4,2±1	легкая
2	16	30,9±7	8,5±7	27±6	4,3±3	средняя
3	21	42,8±9	17,3±8	31±10	3,4±6	тяжелая
4	30	56,3±11	19,4±13	33,2±11	3,1±2	крайне тяжелая
5	10	77±15	62,6±18	28,1±3	2,4±2	критическая
КМТП						
6	21	11±7	4±2	29±9	8,9±4	легкая
7	9	33,3±11	7,2±6	23±4	2,3±2	средняя
8	13	36,9±11	11,8±7	33±11	4,3±5	тяжелая
9	11	54,6±11	29±15	30,6±7	2,6±2	крайне тяжелая
10	11	79±12	69,4±18	29,4±9	2±0,6	критическая

Таблица 2.

Сравнение по тяжести травм

№ группы	Сроки нахождения пораженных в ОАР, сут. (M+m)	Летальность в группах сравнения, % (с указанием 95% доверительного интервала)
Изолированный ожог		
1	17,3±12,3	0
2	12,9±3,6	6±11
3	38,5±12,5	0
4	15,8±2,6	22±17
5	28,1±17,3	86±26
КМТП		
6	9,1±2,3	5±9
7	23,6±7,17	0
8	19,6±5,1	21±22
9	22,4±11	57±37
10	6,7±1,32	100

Результаты

Была проанализирована структура пациентов, проходивших лечение в отделении анестезиологии и реанимации в период 2014–2022 год. (Рисунок 1).

Диаграммы демонстрируют, что изолированные ожоги составляли меньшую часть (около 1/3) от общего числа пациентов с термическими поражениями. На долю комбинированных поражений пришлось около 50 % всех травм, тогда как в условиях отсутствия напряжённых вооружённых конфликтов их соотношение было прямо противоположным.

Значимого увеличения площади ожогов кожи у поступающих за последний год не произошло, равно как и их среднего возраста. Это утверждение справедливо для поверхностных и глубоких ожогов кожи (Рисунок 2).

Контрольные группы были статистически однородны (p> 0,05), за исключением группы пациентов с изолированными тяжелыми ожогами. В этой группе наблюдалась существенная разница: доля и площадь глубоких ожогов были значительно выше, чем у пациентов с комбинированной травмой (КМТП). (Рисунок 3).

Длительность госпитализации в отделении анестезиологии и реанимации не показала статистически значимой разницы между группами пациентов с ожогами (p = 0,84). Однако, в группе пациентов с комбинированными травмами, даже при относительно небольшой площади ожоговой поверхности, отмечались случаи летального исхода. (Рисунок 4).

В ходе анализа пациентов с ожогами средней степени тяжести заметно, что длительность пребывания в отделении реанимации не демонстрировала статистически значимых различий между группами, также была отмечена обратная зависимость: изолированные травмы сопровождались единичными летальными исходами, в то время как при комбинированных травмах с ожогами летальность отсутствовала (Рисунок 5).

Время пребывания в отделении анестезиологии и реанимации (ОАР) для пациентов с тяжелыми ожогами и изолированными травмами (таблица 2, группа 3) оказалось значительно дольше, по сравнению с теми, кто пострадал от схожих по степени тяжести ожогов, сопровождающихся комбинированными механическими травмами (КМТП) (таблица 2, группа 8), что может быть связано с 21 % летальности (Рисунок 6).

В отношении крайне тяжелой степени обожжённых пациентов наблюдается повышенный уровень смертности при наличии множественных видов травм (см. таблицу 2, группа 9) по сравнению с некомбинированными повреждениями (таблица 2, группа 4) (Рисунок 7).



Рис. 1. Структура пораженных

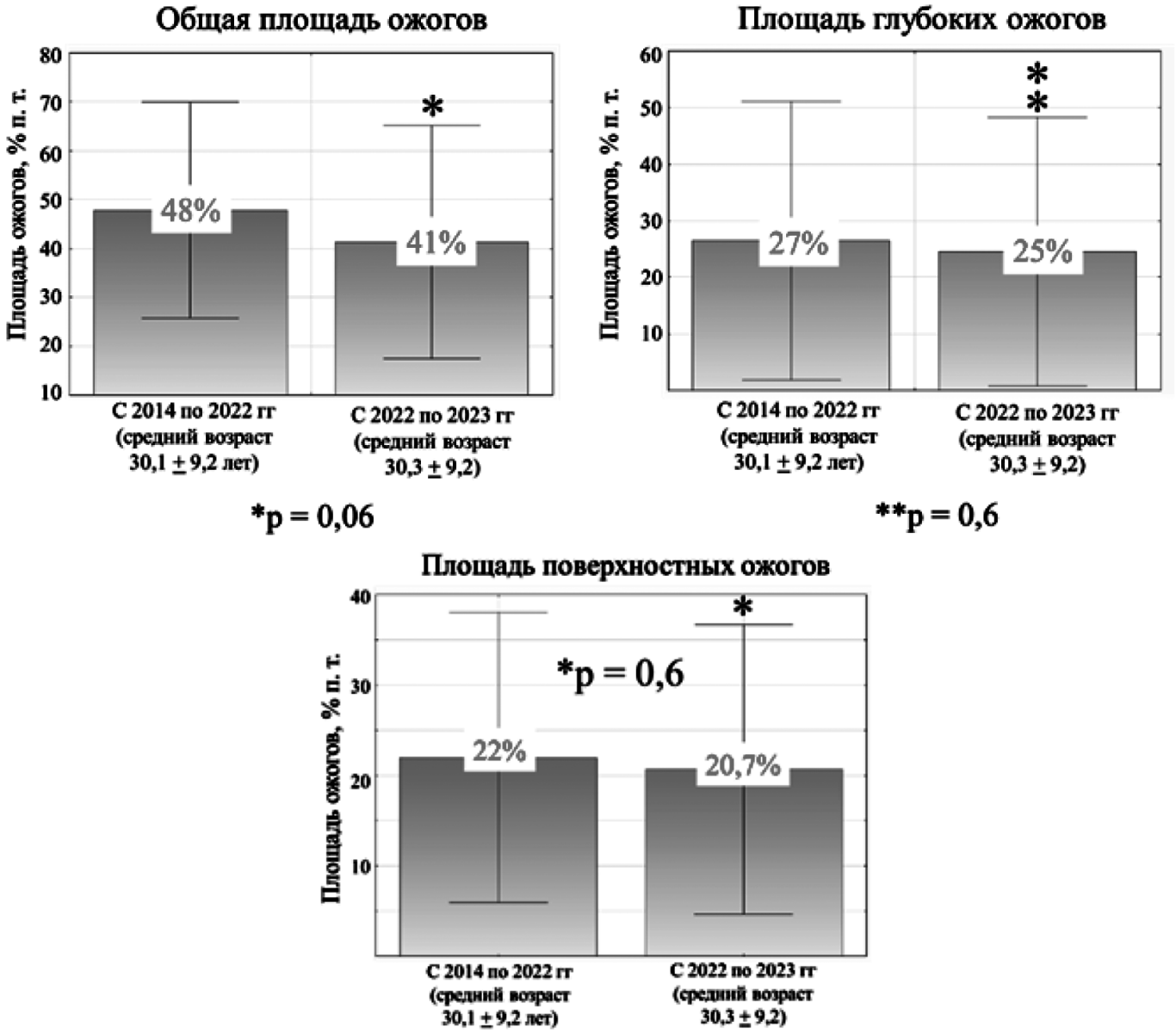


Рис. 2. Характеристики ожоговых травм у пациентов

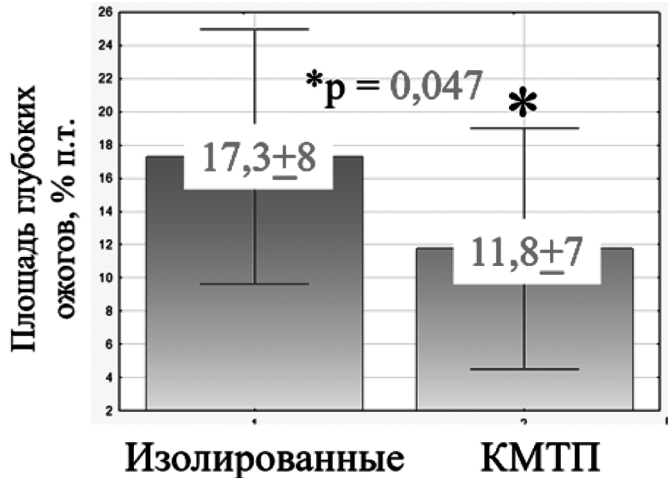


Рис. 3. Сравнение площади ожогов, пораженных с тяжелыми ожогами

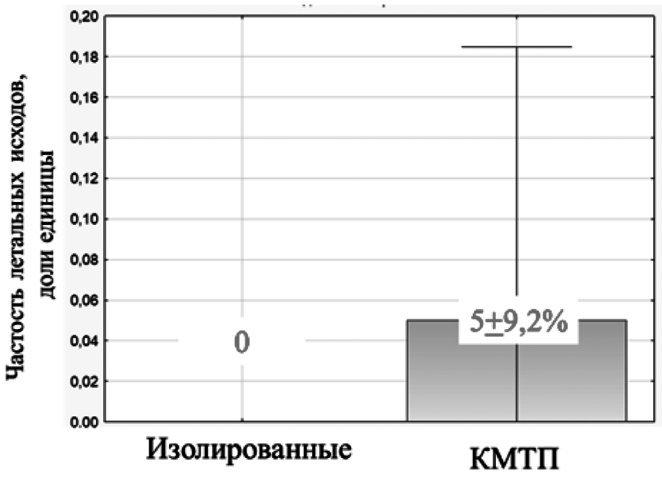


Рис. 4. Частота летальности с легкой ожоговой травмой

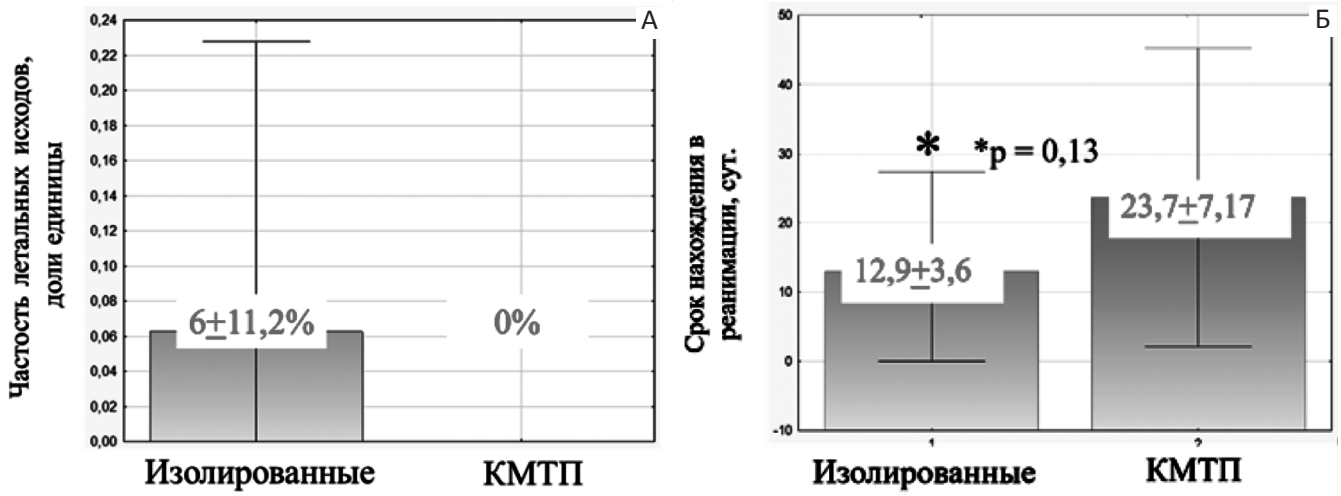


Рис. 5. Анализ летальности (А) и продолжительности пребывания в отделении анестезиологии и реанимации (ОАР) (Б) среди пациентов, получивших ожоги средней степени тяжести

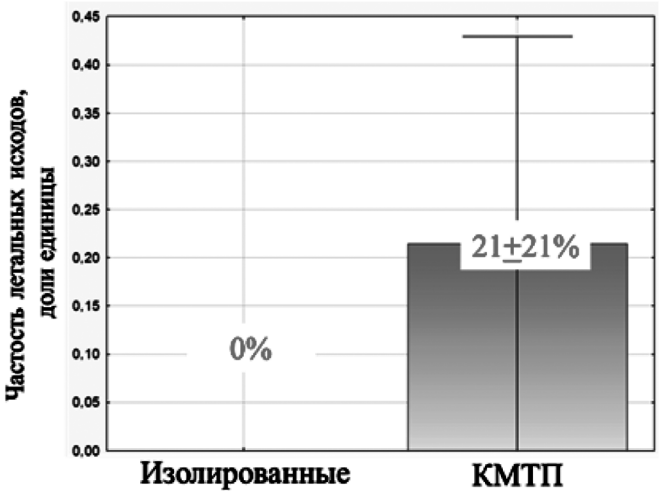


Рис. 6. Анализ смертности в группах, получивших тяжелые ожоговые травмы

Смертность во всех случаях отмечена в группе с критическими ожогами КМТП, в то время как среди пострадавших с исключительно ожоговыми травмами выжило 14 %. Рисунок 8.

Анализ времени лечения в реанимационном отделении между этими двумя группами не выявил статистически значимых различий, однако для пациентов с комбинированными травмами этот период был короче, что возможно объясняется ускоренным наступлением летального исхода, как отражено на Рисунке 9.

Исследование данных выявило, что при комбинированных повреждениях (КМТП) наблюдалось увеличение смертности в результате феномена синергетического ухудшения состояния, особенно внутри определённых групп пострадавших. Однако, различия в длительности

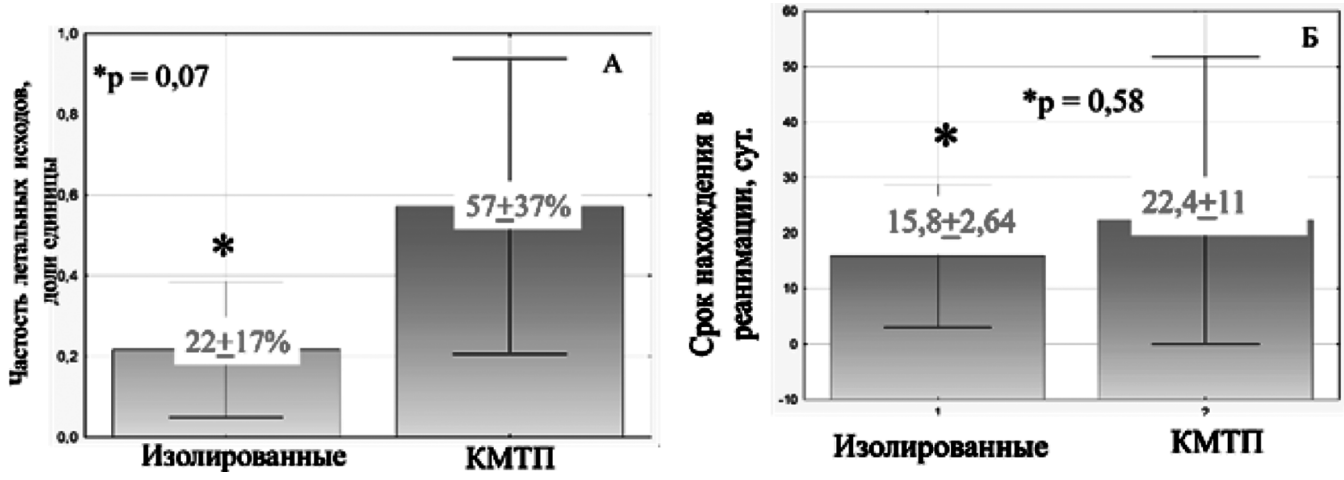


Рис. 7. Анализ уровней смертности (А) и периодов пребывания в отделении анестезиологии и реанимации (Б) у пациентов с критически тяжелыми ожоговыми травмами

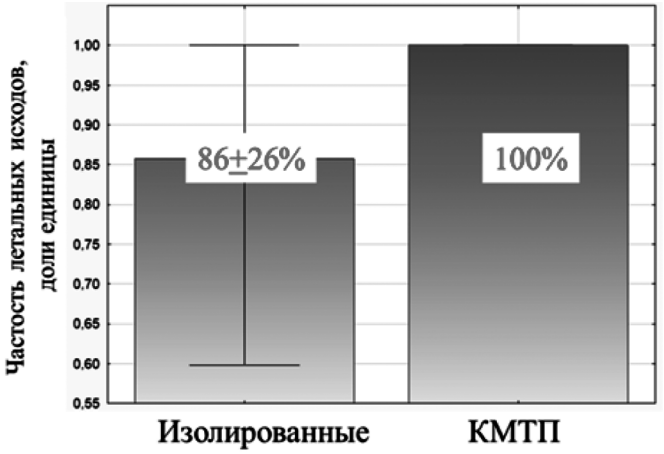


Рис. 8. Частота летальных исходов с критическими ожогами

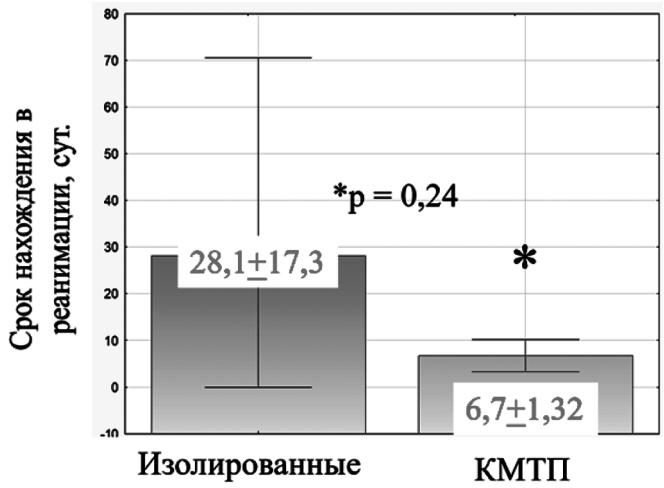


Рис. 9. Сравнение сроков пребывания в ОАР, пораженных с критическими ожогами

пребывания в интенсивной терапии между сравниваемыми группами на основе большинства параметров оказались незначительными, что можно коррелировать с их неоднородностью по аспектам, таким как степень и характер механической составляющей травмы, что подчёркивает значение интеграции этого фактора в процесс стратификации пострадавших для улучшения лечения.

Подводя итог можно заключить, что КМТП являются распространенной патологией военного времени, значимых различий в площади ожогов кожи в сравнении с травмами «мирного времени» не обнаружено.

Несмотря на обилие классификаций изолированных видов травм, позволяющих определять их тяжесть и прогнозировать исход, для КМТП это остается нерешенной проблемой. Для ее решения ключевой задачей является исследование проявлений взаимного отягощения путём сравнительного анализа течения изолированных ожоговой, механической и комбинированных травм. Для получения корректных данных группы сравнения должна быть однородны по ключевым характеристикам, в наибольшей степени влияющим на сравниваемые показатели. В большей степени это достигается путём разделения пострадавших с использованием координатных сеток вероятности летального исхода.

В качестве интегральных показателей, отражающих общую тяжесть течения ожоговых поражений, можно использовать сроки пребывания пострадавших в ОАР, а также частоту наступления летальных исходов. Обнаружение различий данных показателей между группами может свидетельствовать о развитии взаимного отягощения механического и ожогового компонентов КМТП.

Сравнительный анализ историй болезни позволил обнаружить проявления ФВО в группах пострадавших с КМТП с тяжёлыми, крайне тяжёлыми и критическими ожогами.

Для выявления и изучения проявлений взаимного отягощения при различных комбинациях механических и термических поражений (КМТП) необходимо провести более тщательный анализ, стратифицируя пострадавших по степени тяжести механической травмы. Это включает в себя расширенное изучение пациентов из ожоговых отделений, не специализированных исключительно на КМТП, и анализ критических показателей тяжести состояния, таких как время до летального исхода, необходимость и продолжительность механической вентиляции легких, а также оценку тяжести механического компонента по специализированным шкалам, например, ВПХ-П. Статистический анализ данных предполагает выявление ключевых факторов, влияющих на тяжесть КМТП с целью формирования представления о том, какие сочетания травматических компонентов ведут к особо тяжелому течению КМТП. Данные наблюдения могут способствовать созданию новых классификаций комбинированных травм, что позволит более точно прогнозировать тяжесть состояния пациентов и определять наиболее эффективные методы лечения для минимизации взаимоотягощающего эффекта компонентов КМТП.

Заключение

Превалирование комбинированных травм, обусловленных одновременным механическим и термическим воздействием, в условиях ведения боевых действий наблюдается значительно чаще, чем при обстоятельствах, не связанных с военными конфликтами, при этом достоверность данного факта подтверждается статистическими данными ($p = 0,03$). В контексте сравнения обширности ожогов среди пациентов, получающих лечение в рамках специализированной медицинской помощи на фоне боевых операций и в мирное время, заметной разницы выявлено не было, что аргументировано соответствующими статистическими показателями ($p > 0,05$).

Использование метода стратификации на основе таблиц вероятности летального исхода, которые интегрируют данные о распределении ожогов по площади поражения кожного покрова в корреляции с возрастными характеристиками пострадавших, способствует формированию гомогенных групп с вероятностью значимых различий выше 0,05. Это обеспечивает адекватность сравнения по ключевым параметрам, отражающим степень тяжести травм.

При одновременном воздействии механических травм и термических поражений у пациентов с поверхностными ожогами может наблюдаться феномен синергетического усиления негативного эффекта, который значительно более ярко проявляется у пострадавших с глубокими ожогами ($p < 0,05$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А.А. Новые технологии хирургического лечения ожогов / А.А. Алексеев и др. // Проблемы лечения тяжелой термической травмы: тез. докл. VIII Всеросс. науч.-практич. конф. — Нижний Новгород, 2004. — С. 129–130.
2. Войновский А.Е., Колтович А.П. DAMAGE CONTROL SURGERY и комбинированные термомеханические повреждения (КТМП) 2008.
3. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Барометрическое действие взрывов. / Гельфанд Б.Е., Сильников М.В., Астерион-е изд., СПб:, 2006. 658 с.
4. Иванцов В.А. Комбинированные ожоговые поражения / Иванцов В. А., Шанин Ю.И., Сидельников В.О., Мадай Д.Ю., СОТИС-е изд., Санкт-Петербург: 2004. 140 с.
5. Ивченко Е.В. Комбинированные ожоги в структуре современной гражданской и боевой ожоговой травмы / Е.В. Ивченко, Д.Н. Борисов, А.С. Голота [и др.] // Военно-медицинский журнал. — 2015. — Т. 336, № 2. — С. 22–25. — EDN WCBFIV.
6. Палтышев И.А. Программируемое многоэтапное хирургическое лечение раненых с комбинированными термомеханическими повреждениями в локальном вооруженном конфликте: специальность 14.01.17 «Хирургия» автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук / Палтышев Илья Александрович. — Москва, 2014. — 22 с. — EDN ZPEBOF.
7. Рухляда Н.В. Комбинированные поражения хирургического профиля и их компоненты / Рухляда Н.В., Уточкин А.П., Парамонов Б.А., Сидельников В.О., СПб:, 2003. 384 с.
8. Самохвалов И.М. Десять хирургических уроков начального этапа военной операции / И.М. Самохвалов, Е.В. Крюков, В.Ю. Маркевич [и др.] // Военно-медицинский журнал. — 2023. — Т. 344, № 4. — С. 4–10. — DOI 10.52424/00269050_2023_344_4_4. — EDN DSYIAP.
9. Сидельников В.О. Боевые ожоговые поражения / Сидельников В.О., Фисун А.Я., Цыган В.Н., Иванцов В.А., Санкт-Петербург: «Издательство «СпецЛит», 2019. 247 с.
10. Щеголев А.В. Изменение подходов к анестезиологической помощи в условиях проведения специальной военной операции / А.В. Щеголев, А.А. Кузин, Р.Е. Лахин [и др.] // Военно-медицинский журнал. — 2023. — Т. 344, № 9. — С. 19–24. — DOI 10.52424/00269050_2023_344_9_19. — EDN OMHPNU.

© Савинков Игорь Юрьевич (igorsavinkov@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.39

ПРЕДИКТОРЫ РАЗВИТИЯ ЖИЗНЕУГРОЖАЮЩИХ ОСЛОЖНЕНИЙ (КАРДИОГЕННОГО ШОКА И ОТЁКА ЛЁГКИХ) У ПАЦИЕНТОВ С ОСТРЫМ КОРОНАРНЫМ СИНДРОМОМ НА ФОНЕ СИНДРОМА НЕДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ДИСПЛАЗИИ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ

PREDICTORS OF LIFE-THREATENING COMPLICATIONS (CARDIOGENIC SHOCK AND PULMONARY EDEMA) IN THE ACUTE PERIOD OF MYOCARDIAL INFARCTION IN PATIENTS WITH UNDIFFERENTIATED CONNECTIVE TISSUE DYSPLASIA SYNDROME

O. Sultanova
E. Chernysheva
E. Popov
N. Prokopenko
A. Pechorov
S. Kasatkina
S. Sultanova

Summary. *Objective:* To determine the prognostic significance of plasma homocysteine (Hcy) and magnesium (Mg) levels for assessing the risk of life-threatening complications (cardiogenic shock and pulmonary edema) in the acute period of myocardial infarction in patients with undifferentiated connective tissue dysplasia syndrome (UCTDS). *Materials and methods*: The study included 113 patients with a confirmed diagnosis of acute coronary syndrome (ACS) against the background of UCTDS, who were treated in the Regional Vascular Center of Astrakhan in the period 2019–2025. All patients underwent determination of Hcy and Mg levels in blood serum on the 1st day of hospitalization. The development of cardiogenic shock and/or pulmonary edema within the first 7 days from the onset of ACS was considered as endpoints. Statistical data processing was performed using STATISTICA 12.0 software. ROC analysis with calculation of the area under the curve (AUC), sensitivity and specificity were used to assess the prognostic significance of the indicators. *Results:* The development of life-threatening complications was observed in 44 (38.9 %) patients. Statistically significant differences in Hcy and Mg levels were found between the groups with complicated and uncomplicated course. Based on ROC analysis, threshold values were determined: Hcy level > 29.25 μmol/l (AUC=0.846; sensitivity 95.7 %, specificity 77.6 %) and Mg level < 0.59 mmol/l (AUC=0.927; sensitivity 97.7 %, specificity 76.8 %) are highly informative predictors of life-threatening complications. The prognostic model developed based on logistic regression (χ^2=86.373; p<0.001) demonstrated high diagnostic efficiency (92.0 %). *Conclusion:* Determination of homocysteine and magnesium levels in blood serum on the 1st day of ACS in patients with UCTDS allows for high-accuracy risk stratification for the development

Султанова Оксана Эседуллаевна
кандидат медицинских наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
oksanka.sultanova@mail.ru
Чернышева Елена Николаевна
доктор медицинских наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
lena.chernysheva@inbox.ru
Попов Евгений Антонович
доктор медицинских наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
agmapro@mail.ru
Прокопенко Надежда Андреевна
кандидат медицинских наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
kak33333@mail.ru
Печеров Александр Андреевич
доктор медицинских наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
kak33333@mail.ru
Касаткина Светлана Григорьевна
кандидат медицинских наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
SvetlanaAGMA@yandex.ru
Султанова Самира Шамилевна
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
taetae.samira.2004@mail.ru

of cardiogenic shock and pulmonary edema. The identified threshold values can be used in clinical practice to form high-risk groups and timely intensify therapy.

Keywords: acute coronary syndrome, myocardial infarction, connective tissue dysplasia, homocysteine, magnesium, cardiogenic shock, pulmonary edema, prognosis.

Аннотация. *Цель исследования:* определить прогностическую значимость уровней гомоцистеина (Hcy) и магния (Mg) в плазме крови для оценки риска развития жизнеугрожающих осложнений (кардиогенного шока и отёка лёгких) у пациентов с острым коронарным синдромом на фоне синдрома недифференцированной дисплазии соединительной ткани (СНДСТ). *Материалы и методы:* В исследование были включены 113 пациентов с подтверждённым диагнозом острого коронарного синдрома (ОКС) на фоне СНДСТ, находившихся на лечении в Региональном сосудистом центре г. Астрахани в период 2019–2025 гг. Всем пациентам на 1-е сутки госпитализации проводилось определение уровней Hcy и Mg в сыворотке крови. В качестве конечных точек рассматривалось развитие кардиогенного шока и/или отёка лёгких в течение первых 7 дней от момента развития ОКС. Статистическая обработка данных выполнена с использованием программы STATISTICA 18.0. Для оценки прогностической значимости показателей проведён ROC-анализ, с расчётом площади кривой (AUC), чувствительности и специфичности. *Результаты:* У 44 (38,9 %) пациентов наблюдалось развитие жизнеугрожающих осложнений. Установлены статистически значимые различия в уровнях Hcy и Mg между группами с осложнённым и неосложнённым течением. На основании ROC-анализа определены пороговые значения: уровень Hcy> 29,25 мкмоль/л (AUC=0,846; чувствительность 95,7 %, специфичность 77,6 %) и уровень Mg <0,59 ммоль/л (AUC=0,927; чувствительность 97,7 %, специфичность 76,8 %) являются высокоинформативными предикторами развития жизнеугрожающих осложнений. Разработанная на основе логистической регрессии прогностическая модель (χ^2=86,373; p <0,001) продемонстрировала высокую диагностическую эффективность (92,0 %). *Заключение:* Определение уровней гомоцистеина и магния в сыворотке крови в 1-е сутки ОКС у пациентов с СНДСТ позволяет с высокой точностью стратифицировать риск развития кардиогенного шока и отёка лёгких. Выявленные пороговые значения могут быть использованы в клинической практике для формирования групп повышенного риска и своевременной интенсификации терапии.

Ключевые слова: острый коронарный синдром, инфаркт миокарда, дисплазия соединительной ткани, гомоцистеин, магний, кардиогенный шок, отёк лёгких, прогнозирование.

Введение

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) продолжают занимать лидирующие позиции в структуре смертности и инвалидизации населения Российской Федерации, нанося значительный экономический ущерб [1; 2]. Особую тревогу вызывает рост летальности среди пациентов трудоспособного возраста, при этом все большее значение в патогенезе острых коронарных событий придаётся фоновым состояниям, модифицирующим течение заболевания [3; 4].

Синдром недифференцированной дисплазии соединительной ткани (СНДСТ) представляет собой генетически детерминированное состояние, характеризующееся дефектами волокнистых структур и основного вещества соединительной ткани, что приводит к нарушению формообразования органов и систем [5; 6; 7]. Распространённость СНДСТ в популяции достигает 20–25 %, однако среди пациентов с острым коронарным синдромом (ОКС) этот показатель, по данным различных авторов, может достигать 42 %, что подтверждает роль соединительнотканных нарушений как неблагоприятного преморбидного фона [8; 9].

Развитие жизнеугрожающих осложнений, таких как кардиогенный шок и отёк лёгких, в острейшем периоде инфаркта миокарда (ИМ) значительно ухудшает прогноз и повышает риск летального исхода [10]. В связи с этим поиск доступных и информативных биомаркеров, позволяющих на ранних этапах стратифицировать риск развития данных осложнений, является приоритетной задачей современной кардиологии.

В предыдущих исследованиях нами было показано, что у пациентов с СНДСТ имеет место дисбаланс таких ключевых метаболических показателей, как гомоцистеин (Hcy) и магний (Mg), что ассоциировано с более тя-

жёлым течением ОКС и повышенной частотой осложнений [3]. Однако прогностическая значимость пороговых уровней данных маркеров именно в отношении развития кардиогенного шока и отёка лёгких у этой категории больных изучена недостаточно.

Цель исследования

Определить прогностическую значимость уровней гомоцистеина и магния в плазме крови для оценки риска развития жизнеугрожающих осложнений (кардиогенного шока и отёка лёгких) в острейшем периоде инфаркта миокарда у пациентов с синдромом недифференцированной дисплазии соединительной ткани.

Материалы и методы

Дизайн исследования. Работа выполнена как проспективное когортное исследование на базе Регионального сосудистого центра ГБУЗ АО АМОКБ и ГКБ № 3 имени С.М. Кирова г. Астрахани в период 2019–2025 гг. Протокол исследования одобрен Региональным независимым этическим комитетом (протокол № 2 от 24.12.2020 г.). От всех пациентов получено информированное согласие на участие.

Критерии включения: верифицированный диагноз ОКС с подъёмом или без подъёма сегмента ST, возраст от 35 до 65 лет, наличие подтверждённого СНДСТ, госпитализация не позднее 12 часов от момента развития ангинозного приступа.

Критерии исключения: гемодинамически значимые пороки сердца, некоронарогенные заболевания миокарда, острые воспалительные и хронические заболевания в фазе обострения, злокачественные новообразования, болезни крови, хроническая сердечная недостаточность II Б–III стадии, тяжёлая печёночная и почечная недостаточность, сахарный диабет.

Характеристика пациентов. В исследование включены 113 пациентов с ОКС на фоне СНДСТ. Медиана возраста составила 48,0 [43; 53] лет. Среди обследованных преобладали мужчины — 70 (62 %). Структура ОКС: с подъёмом сегмента ST — 81 (72 %) пациент, без подъёма сегмента ST — 32 (28 %) пациента. Диагноз СНДСТ верифицирован на основании клинических рекомендаций с использованием анкетирования по Елыкомову В.А. и Копылову А.Н. (патент № 2665387) и определения уровня оксипролина (ОР) в сыворотке крови методом ИФА.

Лабораторные методы. Забор крови производился в 1-е сутки госпитализации. Уровень гомоцистеина определяли методом иммуноферментного анализа с использованием тест-системы «Axis Homocysteine» (Великобритания). Содержание магния в сыворотке крови определяли колориметрическим методом с использованием набора реагентов «Симко» (Россия) на биохимическом анализаторе.

Конечные точки. Основными оцениваемыми исходами являлись развитие кардиогенного шока и/или отёка лёгких в течение первых 7 суток от момента госпитализации. Диагностика осложнений осуществлялась на основании клинических критериев и данных инструментальных методов обследования.

Статистический анализ. Статистическая обработка данных проводилась с использованием пакета программ STATISTICA 18.0 (StatSoft, Inc.). Проверка нормальности распределения выполнялась с использованием критерия Колмогорова–Смирнова. Количественные показатели представлены в виде медианы и интерквартильного размаха Me [Q1; Q3]. Для сравнения двух независимых групп по количественным признакам применяли U-критерий Манна–Уитни. Для оценки прогностической значимости показателей проведён ROC-анализ с расчётом площади под ROC-кривой (AUC), чувствительности и специфичности. Для создания прогностической модели использовали метод бинарной логистической регрессии. Критический уровень статистической значимости принимали при $p < 0,05$.

Результаты исследования

В ходе 7-дневного наблюдения жизнеугрожающие осложнения развились у 44 (38,9 %) пациентов: кардиогенный шок диагностирован у 10 (8,8 %) пациентов, отёк лёгких — у 17 (15,0 %) пациентов. У остальных 17 пациентов наблюдалось сочетание различных осложнений, включённых в анализ.

Сравнительный анализ уровней Hcy и Mg. При сравнении групп пациентов с развившимися и неразвившимися осложнениями выявлены статистически значимые различия (табл. 1). У пациентов с осложнённым течением уровень Hcy был в 2,1 раза выше, а уровень Mg — в 1,5 раза ниже, чем у пациентов без осложнений.

Таблица 1.

Уровни гомоцистеина и магния у пациентов с ОКС и СНДСТ в зависимости от развития жизнеугрожающих осложнений

Показатель	Группа без осложнений (n=69)	Группа с осложнениями (n=44)	p-уровень
Hcy, мкмоль/л	24,8 [18,3; 31,2]	52,3 [37,7; 56,1]	<0,001
Mg, ммоль/л	0,78 [0,69; 0,85]	0,52 [0,43; 0,61]	<0,001

Наиболее высокие уровни Hcy зарегистрированы в подгруппе пациентов с кардиогенным шоком — 54,3

[37,7; 56,1] мкмоль/л, что статистически значимо превышало показатели подгруппы с отёком лёгких — 49,4 [33,2; 52,1] мкмоль/л (p <0,001). *ROC-анализ и определение пороговых уровней.* Для оценки прогностической значимости исследуемых показателей и определения пороговых значений проведён ROC-анализ. Установлено, что уровень Hcy обладает хорошей прогностической способностью в отношении развития жизнеугрожающих осложнений. Площадь под ROC-кривой (AUC) составила 0,846±0,038 (95 % ДИ: 0,771–0,922; p <0,001). Пороговое значение Hcy > 29,25 мкмоль/л продемонстрировало оптимальное соотношение чувствительности (95,7 %) и специфичности (77,6 %). Уровень Mg показал отличную прогностическую способность: AUC = 0,927±0,029 (95 % ДИ: 0,870–0,984; p <0,001). Пороговое значение Mg <0,59 ммоль/л позволило прогнозировать развитие осложнений с чувствительностью 97,7 % и специфичностью 76,8 %.

Разработка прогностической модели. На основании результатов бинарной логистической регрессии разработана прогностическая модель, позволяющая рассчитать индивидуальную вероятность развития жизнеугрожающих осложнений у конкретного пациента:

$$p = 1 / (1 + e^{-z}),$$

где z = 26,588–0,121 × Hcy (мкмоль/л) — 45,165 × Mg (ммоль/л).

Модель является статистически значимой (Omnibus Test: χ^2=86,373; df=2; p <0,001). Значения коэффициентов регрессии и их значимость представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Коэффициенты логистической регрессионной модели

Предиктор	β-коэффициент	Стандартная ошибка	Значение Wald	p-уровень
Hcy	–0,121	0,086	1,980	<0,001
Mg	–45,165	9,722	21,584	<0,001
Константа	26,588	7,700	11,924	<0,001

При пошаговом включении предикторов установлено, что точность прогноза с использованием только Hcy составила 76,1 %, а при добавлении Mg повысилась до 92,0 %, что свидетельствует о высокой синергической значимости обоих показателей. *Оценка качества модели.* Диагностическая эффективность разработанной модели составила 92,0 % (табл. 3). Чувствительность метода — 94,2 %, специфичность — 88,6 %. Прогностическая ценность положительного результата достигла 92,9 %, отрицательного — 90,7 %. Коэффициент детерминации Нэйджелкерка (R^2=0,725) указывает на высокую объясняющую способность модели.

Таблица 3.

Классификационная таблица прогностической модели

Наблюдаемые исходы	Предсказанные исходы	% правильных	Общий процент
	Осложнений нет	Осложнения есть	94,2
Осложнений нет (n=69)	65	4	88,6
Осложнения есть (n=44)	5	39	92,0

Клинический пример. Пациент Г., 51 год, поступил с диагнозом трансмурального ИМ передне-перегородочной области. При поступлении уровень Hcy составил 45,2 мкмоль/л, Mg — 0,43 ммоль/л. Расчет по модели дал значение z = 1,698 и p = 0,845, что соответствует высокой вероятности развития осложнений (84,5 %). На 2-е сутки госпитализации у пациента развился отек легких, что подтвердило прогностическую ценность модели.

Заключение

Результаты проведённого исследования позволяют сделать следующие выводы:

- у пациентов с острым коронарным синдромом на фоне синдрома недифференцированной дисплазии соединительной ткани отмечается высокая частота развития жизнеугрожающих осложнений — 38,9 %, при этом кардиогенный шок развивается у 8,8 %, отёк легких — у 15,0 % пациентов;
- уровни гомоцистеина и магния в сыворотке крови, определяемые в 1-е сутки госпитализации, являются высокоинформативными предикторами развития кардиогенного шока и отёка лёгких у данной категории пациентов;
- установлены пороговые значения показателей, ассоциированные с максимальным риском развития жизнеугрожающих осложнений: уровень Hcy > 29,25 мкмоль/л (чувствительность 95,7 %, специфичность 77,6 %) и уровень Mg<0,59 ммоль/л (чувствительность 97,7 %, специфичность 76,8 %).

Разработанная прогностическая модель на основе определения уровней Hcy и Mg обладает высокой диагностической эффективностью (92,0 %) и позволяет с высокой точностью индивидуализировать оценку риска развития кардиогенного шока и отёка лёгких у пациентов с ОКС на фоне СНДСТ.

Внедрение в клиническую практику предложенных пороговых значений и прогностической модели будет способствовать своевременному выделению пациентов группы высокого риска и проведению превентивных

мероприятий, направленных на снижение летальности в острейшем периоде инфаркта миокарда.

Таким образом, определение уровней гомоцистеина и магния следует рекомендовать в качестве обязательных диагностических тестов при поступлении пациентов с ОКС и признаками дисплазии соединительной ткани для оптимизации стратификации риска и выбора тактики ведения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эрлих А.Д. Российский регистр острого коронарного синдрома «Рекорд-3». Характеристика пациентов и лечение до выписки из стационара / А.Д. Эрлих, Н.А. Грацианский. — Текст: непосредственный // Кардиология. — 2016. — Т. 56, № 4. — С. 16–24.
2. Marković B.M. A relation of serum homocysteine, uric acid, and C-reactive protein level in patients with acute myocardial infarction / B.M. Marković, A. Čaušević, I. Brizić, I. Mikulić, M. Vasily. — Text: direct // Medicinski Glasnik. — 2018. — Vol. 15, № 2. — P. 101–108.
3. Барбараш О.Л. Особенности клинического течения и стационарного этапа лечения пациентов с острым коронарным синдромом с подъемом сегмента ST в зависимости от пола (по данным Российского регистра острого коронарного синдрома «Рекорд-3» / О.Л. Барбараш, В.В. Кашталап, И.С. Быкова, А.Д. Эрлих [и др.] // Российский кардиологический журнал. — 2017. — № 6 (146). — С. 122–131.
4. Hemradj V.V. Cardiogenic Shock Predicts Long-term Mortality in Hospital Survivors of STEMI Treated with Primary Percutaneous Coronary Intervention / V.V. Hemradj, J.P. Ottervanger, A.W. Hof [et al.]. — Text: direct // Clin. Cardiol. — 2016. — Vol. 39. — P. 4–7.
5. Концевая А.В. Экономический ущерб от сердечно-сосудистых заболеваний в Российской Федерации в 2016 году / А.В. Концевая, О.М. Драпкина [и др.]. — Текст: непосредственный // Рациональная фармакотерапия в кардиологии. — 2018. — Т. 14, № 2. — С. 156–166.
6. Султанова О.Э. Частота встречаемости депрессивного синдрома у пациентов с острым коронарным синдромом на фоне недифференцированной дисплазии соединительной ткани / О.Э. Султанова, Е.Н. Чернышева, Б.Ю. Кузьмичев, А.Х. Рзаева. // Заметки ученого. — 2021. — № 4. — С. 80–87.
7. Pushpakumar S. Dysfunction: The Link Between Homocysteine and Hydrogen Sulfide / S. Pushpakumar, S. Kundu, U. Sen. — Text: direct // Curr. Med. Chem. — 2014. — Vol. 21, № 32. — P. 3662–3672.
8. Peng H.Y. Elevated homocysteine levels and risk of cardiovascular and all-cause mortality: a meta-analysis of prospective studies / H.Y. Peng, C.F. Man, J. Xu, Y. Fan. // J. Zhejiang Univ. Sci. B. — 2015. — Vol. 16, № 1. — P. 78–86.
9. Altura B.M. Short-term Mg deficiency upregulates proteinkinase C isoforms in cardiovascular tissues and cells; relation to NF-kB, cytokines, ceramide salvage sphingolipid pathway and PKC-zeta: hypothesis and review / B.M. Altura. — Text: direct // Intern. J. Clin. Exp. Med. — 2014. — № 7. — P. 1–21.
10. Witte K.K. Micronutrients and their supplementation in chronic cardiac failure. An update beyond theoretical perspectives / K.K. Witte, A.L. Clark. — Text: direct // Heart Fail. Rev. — 2006. — Vol. 11, № 1. — P. 65–74.

© Султанова Оксана Эседуллаевна (oksanka.sultanova@mail.ru); Чернышева Елена Николаевна (lena.chernysheva@inbox.ru);
Попов Евгений Антонович (agmapro@mail.ru); Прокопенко Надежда Андреевна (kak33333@mail.ru);
Печеров Александр Андреевич (kak33333@mail.ru); Касаткина Светлана Григорьевна (SvetlanaAGMA@yandex.ru);
Султанова Самира Шамилевна (taetae.samira.2004@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.42

ВЛИЯНИЕ АУТОЛОГИЧНЫХ СЕКРЕТОРНЫХ ПРОДУКТОВ НЕЙТРОФИЛОВ (НЕЙТРОФИЛОКИНОВ) НА БАКТЕРИОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ РАНЫ У БОЛЬНЫХ С РАНЕВОЙ ХИРУРГИЧЕСКОЙ ИНФЕКЦИЕЙ

INFLUENCE OF AUTOLOGOUS SECRETORY PRODUCTS OF NEUTROPHILS (NEUTROPHYLOKINS) ON THE BACTERIOLOGICAL STATE OF THE WOUND IN PATIENTS WITH SURGICAL WOUND INFECTION

I. Tretyakova

Summary. This article demonstrates that local immunocorrection in patients with surgical wound infection using autologous neutrophylokins obtained by activating granulocytes through adhesion to plastics reduced wound bacterial loads and prevented the development of secondary infections.

Keywords: autologous neutrophil secretory products, local immunocorrection, surgical wound infection, wound bacteriological status.

Третьякова Ирина Евгеньевна
Доктор медицинских наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Северо-Осетинская государственная медицинская академия, г. Владикавказ
tretjakova.60@mail.ru

Аннотация. В статье показано, что при проведении у больных с раневой хирургической инфекцией локальной иммунокоррекции с помощью аутологичных нейтрофилокинов, полученных при активации гранулоцитов адгезией на пластике, уменьшался уровень бактериальной обсемененности ран, не развивалась вторичная инфекция.

Ключевые слова: аутологичные секреторные продукты нейтрофилов, локальная иммунокоррекция, раневая хирургическая инфекция, бактериологическое состояние раны.

Введение

Одним из важных факторов, характеризующих раневой процесс, является раневая инфекция. Развитие раневой инфекции есть результат взаимодействия (противоборства) микробной флоры и защитных реакций организма [1]. Установлено, что секреторные продукты нейтрофилов (нейтрофилокины) влияют на функциональную активность иммунокомпетентных клеток [2, 3, 4]. Между тем, не изучено действие нейтрофилокинов на бактериологическое состояние раны, на регенеративные процессы, происходящие в поврежденных тканях. В связи с этим, перед нами была поставлена задача оценить влияние аутологичных супернатантов активированных нейтрофилов на бактериологическое состояние раны у больных с раневой хирургической инфекцией.

Материалы и методы

Для реализации поставленной задачи был использован ранее разработанный нами способ локальной иммунокоррекции при раневой хирургической инфекции, основанный на использовании аутологичных секреторных продуктов нейтрофилов (нейтрофилокинов) крови больных, обладающих иммуностимулирующим действием [5]. На использование этого способа получено разрешение Этического комитета. Каждому больному в доступной форме объяснялись цель и сущность способа локальной иммунокоррекции с помощью аутологичных супернатантов нейтрофилов. Только после письменного согласия пациенту местно назначали аутологичные нейтрофилокины. Клиническое испытание было рандомизированным. Опытная группа и группа сравнения были сопоставимы по возрасту, полу, локализации гнойного раневого процесса, тяжести заболевания.

Аутологичные секреторные продукты нейтрофилов выделяли после активации этих клеток адгезией на пластмассовых лабораторных чашках Петри [6]. В данной работе обследовали больных с локализованными гнойно-воспалительными заболеваниями мягких тканей туловища и конечностей (абсцессы, флегмоны, карбункулы).

При анализе эффективности местного применения аутологичных нейтрофилокинов мы оценивали бак-

териологическое состояние раны дважды: в 1 сутки и на 13–14 сутки после оперативного вмешательства. При бактериологическом исследовании мы проводили качественное и количественное изучение раневой микрофлоры. При этом использовали две группы больных: 1-группа сравнения, в которой пациенты получали лечение по общепринятой схеме. В качестве плацебо использовали изотонический раствор NaCl; 2-группа, в которой больным в дополнение к традиционным способам лечения проводили метод локальной иммунокоррекции с помощью аутологичных нейтрофилокинов, выделенных при стимуляции ПМЯЛ адгезией на пластике.

Бактериологические методы исследования заключались в идентификации возбудителей раневой инфекции и определении их чувствительности к антибактериальным препаратам, а также количественное определение содержания микроорганизмов (КОЕ) в 1,0 мл раневого отделяемого.

Полученные результаты исследований были подвергнуты статистической обработке с использованием пакетов статистических программ STADIA 6,3; Statistica for Windows 5,0.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования показали, что в 1 сутки после поступления в стационар у больных обеих групп были выделены стафилококки: Staphylococcus aureus, Staphylococcus saprophyticus и стрептококки: Streptococcus pyogenes.

На 13–14 сутки стационарного лечения число больных в группе сравнения с выделенным золотистым стафилококком оставалось на прежнем уровне. Кроме того, в этой группе больных при повторном обследовании были выделены возбудители вторичной инфекции: Pseudomonas aeruginosa, Escherichia coli, Klebsiella pneumoniae.

На 13–14 сутки у пациентов, которым проводили метод локальной иммунокоррекции с помощью аутологичных нейтрофилокинов, получена иная картина микробного пейзажа. В этой группе отмечена тенденция к снижению количества больных с выделенным золотистым стафилококком. Кроме того, не выявлено ни одного случая развития вторичной инфекции. Если в группе сравнения количество больных с выделенной микрофлорой оставалось на прежнем уровне, то в опытной группе выявлена тенденция к снижению числа больных с обнаруженной микрофлорой в раневом отделяемом.

При количественном изучении раневой микрофлоры у больных с раневой хирургической инфекцией мы определяли процентное количество пациентов с уровнем бактериальной обсемененности ран 10^5 КОЕ/мл и более, а также общее количество микроорганизмов (КОЕ/1,0 мл) в раневом отделяемом у всех больных в группе. В настоящее время доказано, что при обсемененности раны выше 10^5 микроорганизмов в 1,0 мл раневого отделяемого развивается нагноение даже в жизнеспособных тканях [1].

При количественной оценке бактериологического состава ран между исследуемыми группами больных не было выявлено достоверной разницы в исходных значениях. При повторном обследовании в опытной группе в 3 раза уменьшилось количество пациентов с уровнем бактериальной обсемененности ран 10^5 и более КОЕ/мл (табл. 1).

Таблица 1.

Влияние аутологичных нейтрофилокинов на уровень бактериальной обсемененности ран у больных с раневой хирургической инфекцией

Содержание микроорганизмов в 1,0 мл раневого отделяемого	Статистические показатели	Процент больных с уровнем бактериальной обсемененности ран 10^5 и более КОЕ/мл раневого отделяемого			
		Группа сравнения n=10		Больные, получавшие местно аутонейтрофилокины n=10	
		1 сутки	13–14 сутки	1 сутки	13–14 сутки
10^5 и более	% p	20,0	70,0 p <0,05	33,3	11,1-

Примечание: p-достоверность различий показателей внутри группы больных (между данными первого и второго обследования). Использован точный критерий Фишера.

Общее количество микроорганизмов в 1,0 мл раневого отделяемого в опытной группе достоверно снизилось более чем в 20 раз по сравнению с данными повторного обследования в группе сравнения (табл.2).

В группе сравнения у больных с раневой хирургической инфекцией на 13–14 сутки наблюдения более чем в 3 раза увеличилось количество больных с уровнем бактериальной обсемененности ран 10^5 и более КОЕ/мл (p <0,05) (табл.1). Общее количество микроорганизмов в 1,0 мл раневого отделяемого у всех больных в группе сравнения при повторном обследовании возросло более чем в 2 раза (табл. 2). Однако эти изменения не были статистически достоверными. Поэтому правильнее будет считать, что отмечалась тенденция к росту числа микроорганизмов в 1,0 мл раневого отделяемого у всех больных в группе сравнения.

Таким образом, при проведении у больных с раневой хирургической инфекцией локальной иммунокор-

Таблица 2.

Влияние аутологичных нейтрофилокинов на количество микроорганизмов в 1,0 мл раневого отделяемого у больных с раневой хирургической инфекцией (M±m)

Показатель обсемененности ран	Группы обследованных			
	Группа сравнения n=10		Больные, получавшие местно аутонейтрофилокины n=10	
	1 сутки	13–14 сутки	1 сутки	13–14 сутки
Общее количество микроорганизмов в 1,0 мл раневого отделяемого у всех больных в группе	$2,5 \cdot 10^6 \pm 1,6 \cdot 10^6$	$5,3 \cdot 10^6 \pm 1,8 \cdot 10^{6-}$	$2,3 \cdot 10^6 \pm 1,5 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^5 \pm 1,1 \cdot 10^{5*}$

Примечание: * — достоверность различий показателей внутри группы больных (между данными первого и второго обследования). Использован критерий Вилкоксона.

рекции с помощью аутологичных нейтрофилокинов, полученных при активации гранулоцитов адгезией на пластике, уменьшился уровень бактериальной обсемененности ран, не развивалась вторичная инфекция.

Механизм бактерицидного действия аутологичных секреторных продуктов нейтрофилов заключается в прямом и опосредованном влиянии на микроорганизмы. Прямое влияние заключается в способности повреждать клеточные мембраны микроорганизмов. При изучении биохимического состава супернатантов активированных гранулоцитов, выделенных у больных в фазу воспаления раневого процесса, нами отмечено содержание метаболитов активированного кислорода, в частности продуктов ПОЛ, обладающих бактерицидным действием [7]. Анализ доступной нам литературы показал, что метаболиты активированного кислорода помимо биоцидного действия способны влиять на иммунокомпетентные клетки, в частности, на макрофаги и лимфоциты [8].

При изучении биохимического состава супернатантов активированных адгезией нейтрофилов нами обнаружены протеолитические ферменты, а также лизоцим, которые повреждают мембраны микроорганизмов [7].

Нейтрофилокины могут оказывать и опосредованное влияние на микроорганизмы в ране. Обнаруженные в исследуемых супернатантах провоспалительные цитокины (ИЛ-1α, ИЛ-1β, ИЛ-8, ФНО-α) стимулируют эффекторные функции фагоцитов в ране, обеспечивая элиминацию возбудителей раневой инфекции. После адгезии на пластике нейтрофилов, выделенных у больных в фазу воспаления раневого процесса, отмечены достоверный рост уровня секреции ИЛ-1α, а также тенденция к более высокому уровню выделения ИЛ-1β, ИЛ-8, ФНО-α [9].

Таким образом, устраняя развитие дисбаланса в эффекторных функциях фагоцитов в ране, способствуя развитию полноценной регенерации тканей, улучшая бактериологическое состояние раны, секреторные продукты аутологичных нейтрофилов обеспечивают очищение раны. При этом у большинства больных в опытной группе количество отделяемого из раны становилось незначительным, оно имело серозный характер, рана выполнялась яркими грануляциями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Раны и раневая инфекция / М.И. Кузин, Б.М. Костюченок. — Рипол Классик, 2009. — 106 с.
2. Нейтрофильные гранулоциты как регуляторы иммунитета / А.С. Беляева, Л.В. Ванько, Н.К. Матвеева, Л.В. Кречетова // Журнал «Иммунология». 2016. 37(2). С.129–133.
3. Нейтрофилы и гомеостаз / И.И. Долгушин, О.В. Бухарин. — Екатеринбург, 2001. — 277 с.
4. Alberto Mantovani, Marco A. Cassatella, Sebastien Jaillon. Neutrophils in activation and regulation of innate and adaptive immunity // Nature Reviews Immunology. 2011. Vol.11. P.519–531.
5. Долгушин И.И., Третьякова И.Е., Катунькина Т.В., Латюшина Л.С. Способ локальной иммунокоррекции при раневой хирургической инфекции // Патент РФ № 2234326. — 2004.
6. Третьякова И.Е. Роль секреторных продуктов нейтрофилов в регуляции локальных реакций воспаления и иммунитета.: дис. . . .док. мед. наук: 14.00.36: утв. 02.04.2004. Челябинск, 2003. 407 с.
7. Состояние секреторной функции нейтрофилов в норме и в условиях гнойного раневого процесса / И.Е. Третьякова, И.И. Долгушин // Журнал «Иммунология», 2004. 25(5). С. 260–263.
8. О регуляторной роли активных форм кислорода в клетке / И.А. Гамалей // Журнал «Цитология». 1999. Т.41. С. 767.
9. Третьякова И.Е. Влияние различных способов активации клеток на уровень секреции провоспалительных цитокинов нейтрофилами крови человека / И.Е. Третьякова // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2025. — № 5–2. — С. 157–159. — DOI 10.37882/2223–2966.2025.05–2.25. — EDN ZFBVFX.

© Третьякова Ирина Евгеньевна (tretjakova.60@mail.ru)

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.43

АНАЛИЗ И ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИБОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОККЛЮЗИОННОЙ ПЛОСКОСТИ В КЛИНИКЕ ОРТОПЕДИЧЕСКОЙ СТОМАТОЛОГИИ

ANALYSIS AND CHARACTERIZATION OF DEVICES FOR DETERMINING THE OCCLUSAL PLANE IN THE CLINIC OF ORTHOPEDIC DENTISTRY

A. Turbin
A. Pyanzina
Ya. Nemstsveridze
M. Polidanov
A. Andrushchenko
A. Tomashevsky

Summary. In modern dentistry, before starting extensive orthopedic treatment and especially often with total prosthetics, a huge number of devices are known and used to determine the spatial location of the upper jaw model in the skull, which are necessary to find landmarks in the manufacture of the most aesthetically accurate and functional types of dentures. We are talking about the correct determination of the patient's future occlusal plane. Despite the more than a century-old history of the use of articulators and facial arches, there is insufficient data in the scientific literature on the differences or identity of the position of the cast model of the upper jaw when working with their various types. In this study, we propose a device that, in our opinion, is able to correctly show the position of the occlusal plane relative to the horizon in the articulators most commonly used in dental practice, which thus makes it possible to assess the position of the cast models and make recommendations on choosing the necessary tool for the correct determination of the occlusal plane.

Keywords: articulator, facial arch, Kamper plane, Frankfurt horizontal, H.I.P. plane.

Турбин Андрей Валерьевич
Кандидат медицинских наук, врач-стоматолог, доцент, Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского
avturbin1973@mail.ru
Пьянзина Анна Владимировна
Кандидат медицинских наук, врач-стоматолог, доцент, Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М. Ф. Владимирского
megakafedra@gmail.com
Немсцверидзе Яков Элгуджович
Врач-стоматолог, Специалист научного отдела, Московский медицинский университет «Реавиз»; Врач-клинический ординатор, Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского
9187751@gmail.com
Полиданов Максим Андреевич
Специалист, ассистент, ЧУОО ВО Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург
maksim.polidanoff@yandex.ru
Андрущенко Артём Андреевич
ЧУОО ВО Московский медицинский университет «Реавиз»
andrushchenko_artem@mail.ru
Томашевский Антон Сергеевич
ЧУОО ВО Московский медицинский университет «Реавиз»
anton.t999@yandex.ru

Аннотация. В современной стоматологии перед началом обширного ортопедического лечения и особенно часто при тотальном протезировании известно и применяется огромное количество приборов для определения пространственного расположения модели верхней челюсти в черепе, которые необходимы для поиска ориентиров при изготовлении наиболее точных с точки зрения эстетики и функции различных видов зубных протезов. Речь идет о правильном определении у пациента будущей окклюзионной плоскости. Несмотря на более чем вековую историю применения артикуляторов и лицевых дуг данных о различиях либо идентичности положения загипсованой модели верхней челюсти при работе с различными их типами в научной литературе недостаточно. В данном исследовании предложен прибор, который, по нашему мнению, способен правильно показать положение окклюзионной плоскости по отношению к горизонту в наиболее часто используемых в стоматологической практике артикуляторах, что таким образом дает возможность оценить положение загипсованных моделей и дать рекомендации по выбору необходимого инструмента для корректного определения окклюзионной плоскости.

Ключевые слова: артикулятор, лицевая дуга, камперовская плоскость, франкфуртская горизонталь, плоскость H.I.P.

Введение

Правильное определение положения окклюзионной плоскости является одной из важнейших клинических процедур в протезировании пациентов с дефектами зубных рядов. Из-за влияния на эстетику, функцию и стабильность протеза, ее следует восстанавливать максимально идентично окклюзионной плоскости отсутствующих зубов [1-4]. Согласно «Глоссарию терминов протезирования» (восьмое издание), окклюзионная плоскость определяется как «средняя плоскость, устанавливаемая резцовыми и окклюзионными поверхностями зубов. Как правило, это не плоскость, а скорее плоскостное среднее значение кривизны этих поверхностей» [5,6].

Существуют различные методы, использующие внутриротовые и внеротовые ориентиры для ориентации окклюзионной плоскости. Однако существуют некоторые разногласия по этому поводу. Так некоторые авторы рекомендуют для этого использовать линию соединяющую крыло носа и козелок уха (камперовская плоскость) [7–10], вторые — линию которая проходит от нижней точки края глазницы до самой верхней точке края наружного слухового прохода (франкфуртская горизонталь) [11–13,16,24], остальные считают, что окклюзионную плоскость следует ориентировать по HIP плоскости, т.е. плоскости, проходящей через крылочелюстные выемки и резцовый сосочек на твердом небе [14,15,17,18].

Согласно современным представлениям, положение окклюзионной плоскости у пациентов, использующих зубные протезы, должно быть таким же, как и у пациентов с зубами. Изменения же окклюзионной плоскости приводит к функциональным нарушениям мышц лица и полости рта, что часто может быть причиной изменений функции речи, жевания, глотания, а также эстетики [19,20–23].

Таким образом учитывая важность точного определения положения и влияние наклона установленной окклюзионной плоскости на функцию, эстетику и речь, представляется актуальным разработать метод, позволяющий подобрать прибор способный определить ее в соответствие с окклюзионной плоскостью, ранее существовавшей у естественных зубов конкретного больного.

Цель: Провести диагностику положения модели верхней челюсти у пациента с неизмененной окклюзионной плоскостью с помощью лицевых дуг и анализатора HIP плоскости с загипсовкой в артикуляторы и определить наклон окклюзионной плоскости данной модели к плоскости горизонта в градусах. Сравнить между собой полученные результаты.

Материалы и методы

Для исследования был выбран пациент с физиологическим видом прикуса (ортогнатия), соотношением первых моляров по 1 классу Энгля, отсутствием дефектов зубных рядов и вторичных деформаций, т.е. имеющего неизмененную окклюзионную плоскость. Для диагностики применялись два типа лицевых дуг: среднеанатомическая лицевая дуга сориентированная на камперовскую плоскость (Amann Girrbach Artex), среднеанатомическая лицевая дуга сориентированная на франкуртскую горизонталь (Bioart A7 Plus), а также анализатор H.I.P. плоскости. В начале исследования было определенно положения окклюзионной плоскости при помощи аппарата Шестопалова.

Основной задачей исследования было определить в данных артикуляторах положение загипсованной модели верхней челюсти по отношению к горизонтальной плоскости и в соответствии с полученными результатами сделать выводы и дать рекомендации по выбору наиболее точной модели лицевой дуги. Были использованы: механический маятниковый угломер со шкалой и стандартная монтажная строительная пластина с отверстиями имеющая строго ровную поверхность. Были отлиты 3 гипсовые модели верхней челюсти. Угломер был установлен на пластине в заранее очерченном месте (рисунок 1), а отверстия пластины совмещали с заранее нанесенными на моделях контрольными точками, в данном случае это были — место контакта центральных резцов и дистальная поверхность небного бугра второго верхнего правого моляра (рисунок 2).

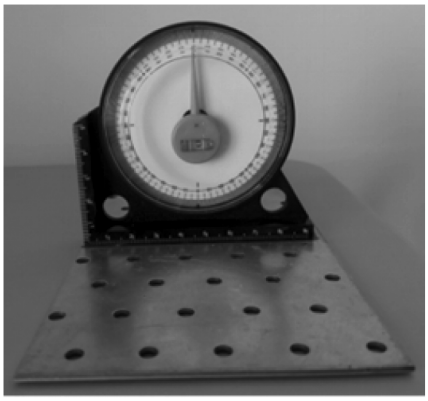


Рис. 1. Угломер, установленный на пластину

Контроль расположения загипсованной модели верхней челюсти в артикуляторе Bioart.

При помощи прикусной вилки был получен оттиск верхнего зубного ряда, а затем трансфер лицевой дуги с прикусной вилкой и с заранее установленной в отпечатки гипсовой моделью верхней челюсти пациента были перенесены в полурегулируемый артикулятор Bioart A7 plus (рисунок 3).

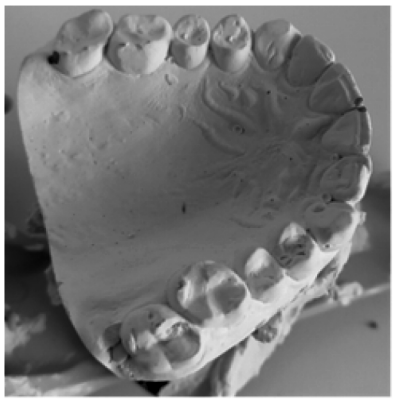


Рис. 2. Модель верхней челюсти с нанесенными отметками



Рис. 3. Трансфер с прикусной вилкой и моделью верхней челюсти установлен в артикулятор

Модель верхней челюсти была загипсована, а затем при помощи угломера и пластины был определено положение артикулятора относительно горизонта (Рисунок 4).



Рис. 4. Модель в/ч загипсована в артикулятор, угломер показывает отсутствие отклонений по горизонту

Поскольку приложить пластину и измерить наклон модели в/ч пригипсованной к верхней раме артикулятора невозможно, мы решили перевернуть артикулятор и проверить соотношение пластиины и нижней рамы артикулятора. При приложении пластины к ней мы получили четко горизонтальную поверхность (Рисунок 5.)



Рис. 5. Артикулятор перевернут, уровень горизонта в норме

Далее модель верхней челюсти с заранее нанесенными контрольными отметками была совмещена с пластиной, угломер показал отклонение от горизонта в районе 6 градусов (Рисунок 6).

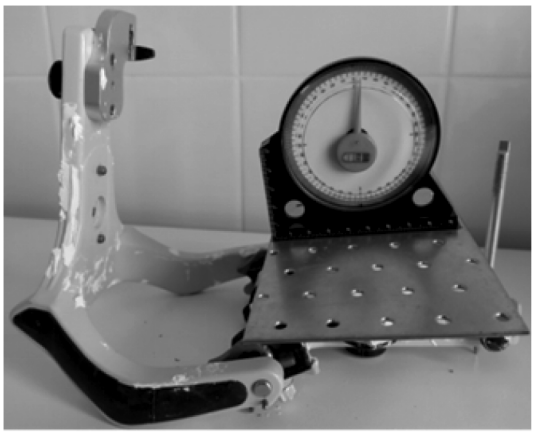


Рис. 6. Проверка уровня наклона модели в/ч в артикуляторе A7 plus

Контроль расположения загипсованной модели верхней челюсти в артикуляторе Amann Girrbach Artex CN. Как и в предыдущем исследовании пациенту была наложена лицевая дуга и проведена загипсовка модели в/ч в артикулятор с проверкой уровня горизонта (Рисунок 7).

Далее мы также провели проверку уровня горизонта в перевернутом артикуляторе Amann Girrbach Artex CN (Рисунок 8).



Рис. 7. Проверка уровня горизонта в артикуляторе Amann Girrbach Artex CN, отклонений нет

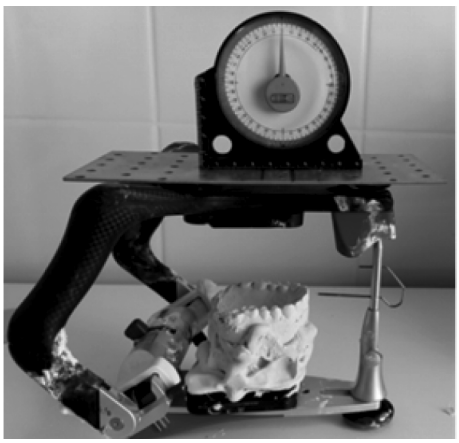


Рис. 8. Проверка уровня горизонта в перевернутом артикуляторе Amann Girrbach Artex CN, отклонений нет

Далее следовало определение уровня наклона модели описанным выше методом. Наклон модели показал отклонение от горизонта на 4 градуса (Рисунок 9).



Рис. 9. Проверка уровня наклона модели в/ч в артикуляторе Amann Girrbach Artex CN

Контроль расположения загипсованной модели верхней челюсти при использовании анализатора H.I.P. плоскости.

На первом этапе, как и в предыдущих исследованиях, проведены наложение и снятие оттиска при помощи вилки анализатора H.I.P. плоскости и загипсовка модели в/ч с проверкой уровня горизонта (Рисунок 10).



Рис. 10. Проверка уровня горизонта в артикуляторе Amann Girrbach Artex CN, горизонт в норме

Поскольку для загипсовки моделей с лицевой дугой и анализатором H.I.P. плоскости мы использовали один и тот же артикулятор, проверку горизонта, которая была в предыдущем примере повторно не проводили, а сразу приступили к определению уровня наклона модели в/ч.

В этом примере он практически полностью совпал с линией горизонта с незначительным отклонением примерно в 0,5 градусов (Рисунок 11).

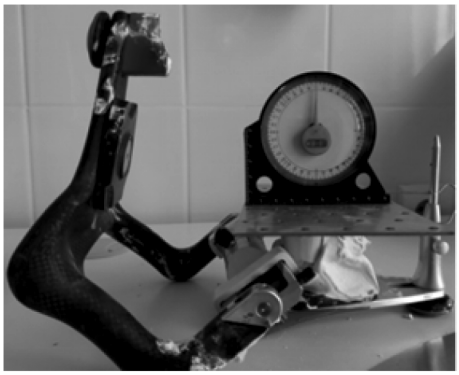


Рис. 11. Проверка уровня наклона модели в/ч в артикуляторе Amann Girrbach Artex CN

Выводы и рекомендации

Учитывая общепринятое соотношение плоскостей для настройки лицевых дуг (камперовская, франкфуртская, hip –плоскость) по отношению к окклюзионной плоскости, а именно то, что, например франкфуртская плоскость наклонена к ней под самым большим углом, камперовская чуть меньшим, а hip— плоскость еще более меньшим, что полученные в процессе исследования

значения данных углов наклона, которые мы получили, подтверждают эти данные. Результаты, полученные в ходе нашего исследования, позволяют также сделать заключение, что наклон модели верхней челюсти, полученный в различных типах артикуляторов с использованием лицевых дуг ориентированных на франкфуртскую либо на камперовскую плоскость различается, но незначительно. Показатель H.I.P. анализатора значительно отличается от 2 предыдущих. Однако, учитывая определеннный наклон камперовской, франкфуртской и H.I.P. плоскости по отношению к окклюзионой плоскости основанный на многолетнем опыте мировых исследований, можно сделать уверенный вывод, что каждый из этих приборов позиционирует модель верхней челюсти одинаково по отношению к горизонтальной плоскости и для практикующего врача не принципиально какому типу и производителю он отдаст предпочтение — пространственное положение модели верхней челюсти будет все равно примерно одинаковым.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богатова Е.А., Лепахина А.А., Никонова Л.Г., Жулев Е.Н., Алекси А. Антропометрическое изучение морфологии HIP-плоскости и корреляционных связей ее параметров с размерами мозговой и лицевой частей черепа. Современные технологии в медицине. 2013;5(2):84–88.
2. Корчагина М.А., Саркисян М.С., Лебеденко И.Ю. Определение уровня и направления окклюзионной плоскости. Анализ данных литературы. Российский стоматологический журнал. 2023;27(2):129–138.
3. Лебеденко И.Ю., Арутюнов С.Д., Антоник М.М. Инструментальная функциональная диагностика зубочелюстной систем, Москва «Медпресс-информ», 2010, 80 с.
4. Нестеров А.М. Современные методы определения протетической плоскости (обзор литературы). Уральский медицинский журнал. 2014;(7):92–99.
5. Рощин Е.М. Диагностика нарушений артикуляции нижней челюсти у больных с дисфункцией височно-нижнечелюстного сустава и их лечение. Автореф. дис. канд. мед. наук / Тверь, 2011. — 24 с.
6. Стафеев А.А., Хижук А.В., Корчагина М.А., Черневич А.А., Тошхужаева А.А. Референтные плоскости, применяемые для позиционирования окклюзионной и протетической плоскостей. Проблемы стоматологии. 2025; 1: 53–59
7. Хватова В.А., Клиническая Гнатология Издательство «Медицина. — 2005.— 296 стр.
8. Шестопалов С.И. Клинические, рентгенологические и радиологические параллели в диагностике дисфункций височно-нижнечелюстного сустава при нарушении функциональной окклюзии: автореф. дис. канд. мед. наук / С.И. Шестопалов. М., 1992. — 24 с.
9. Academy of Denture Prosthetics (2005) The glossary of prosthodontic terms, 8th edn. J Prosthet Dent 94(1):10–92
10. Asusa C Loli, Tarun Kalra, Manjit Kumar, Ajay Bansal, Abhishek Avasthi. To Evaluate and Compare the Position of Frankfort Horizontal Plane and Camper\'s Plane to Occlusal Plane: An In Vivo Study. Dental Journal of Advance Studies 2024 12(2):97–100
11. Chaturvedi S., Thombare R. Cephalometrically assessing the validity of superior, middle, and inferior tragus points on ala-tragus line while establishing the occlusal plane in edentulous patient. J. Adv. Prosthodont. 2013; 5:58–66. doi: 10.4047/jap.2013.5.1.58. [DOI] [PMC free article] [PubMed] [Google Scholar]
12. Kumar P., Parkash H., Bhargava A., Gupta S., Bagga D.K. Reliability of anatomic reference planes in establishing the occlusal plane in different jaw relationships: a cephalometric study. J Indian Prosthodont 2013 13(4):571–7.
13. Kumar P., Singh G., Sahoo S., Singh D., Raghav D., Sarin A. Systematic assessment of the various controversies, difficulties, and current trends in the reestablishment of lost occlusal planes in edentulous patients. Ann. Med. Health Sci. Res. 2014; 4:313–319.
14. Lahori M, Nagrath R, Malik N. A cephalometric study on the relationship between the occlusal plane, ala-tragus, and Camper's lines in subjects with Angle's Class I, Class II, and Class III occlusion. J Indian Prosthodont Soc. 2013; 13:494–8. doi: 10.1007/s13191-012-0215-9.
15. Mazurkiewicz P, Oblizajek M, Rzeszowska J, Sobolewska E, EyChmielewska H, Szymańska-Kozula R. Determining the occlusal plane: a literature review. Cranio. 2022; 40:341–7.
16. Mohsen NA, Radwanelbeialy AR, El-Din H, Zeid S. Reliability of different Frankfurt reference planes for three-dimensional cephalometric analysis: An observational study. IOSR J Dent Med Sci 2018; 17:41–52.
17. Pittayapat P, Jacobs R, Bornstein MM, Odri GA, Lambrichts I, Willems G, et al. Three-dimensional Frankfort horizontal plane for 3D cephalometry: A comparative assessment of conventional versus novel landmarks and horizontal planes. Eur J Orthod 2018; 40:239–48.
18. Rajawat I, Venkataramana V, Patil P, Guram G, Gupta N, Lau M, Thakkar P, Shah DM. A cephalometric evaluation for corelation of different facial types with occlusal plane in dentulous and edentulous patients. Oral Health Dent Manag. 2014; 13:1190.
19. Sanath Shetty, NaziaMajeed, KamalakanthShenoy, V. Rekha. Occlusal plane location in edentulous patients — A Review, Journal of Indian Prosthodontic Society. July–Sept 2013; 13(13):142–148.
20. Shaikh S.A., Lekha K., Mathur G. Relationship between Occlusal Plane and Three Levels of Ala Tragus line in Dentulous and Partially Dentulous Patients in Different Age Groups: A Pilot Study. J. Clin. Diagn. Res. 2015;9: ZC39–ZC42.
21. Sharab L, Jensen D, Hawk G, Kutkut A. A Cephalometric Analysis Assessing the Validity of Camper's Plane to Establishing the Occlusal Plane in Edentulous Patients. Dent J (Basel). 2023;11:81.
22. Tiwari B, Ladha K, Lalit A, Dwarakananda Nb. Occlusal Concepts In Full Mouth Rehabilitation: An Overview. J Indian Prosthodont Soc 2014 Dec;14(4):344–351.
23. Valério P., Xavier M.R., Terçaroli S., Machado A., Gribel M. Occlusal plane parallel to camper plane: reality or fallacy? A tomographic study on human Sambaqui skeletal remains. Jaw Functional Orthopedics and Craniofacial Growth. 2022;2(1):4–10.
24. Veena H. Significance of the Frankfort mandibular plane angle in prosthetic management of partially or completely edentulous patients with Class II malocclusions. J Indian ProsthodontSoc 2005; 5:175–179.

© Турбин Андрей Валерьевич (avturbin1973@mail.ru); Пьянзина Анна Владимировна (megakafedra@gmail.com);
Немсцверидзе Яков Элгуджович (9187751@gmail.com); Полиданов Максим Андреевич (maksim.polidanoff@yandex.ru);
Андрущенко Артём Андреевич (andrushchenko_artem@mail.ru); Томашевский Антон Сергеевич (anton.t999@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.44

ПРИМЕНЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ КАППЫ ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ ОСТРОГО ПАРОДОНТИТА ПРИ ПОДГОТОВКЕ БОЛЬНЫХ К ОРТОПЕДИЧЕСКОМУ ЛЕЧЕНИЮ

THE USE OF AN INDIVIDUAL MOUTH GUARD FOR THE TREATMENT OF ACUTE PERIODONTITIS IN THE PREPARATION OF PATIENTS FOR ORTHOPEDIC TREATMENT

A. Turbin
A. Pyanzina
Ya. Nemstsveridze
M. Polidanov
A. Andrushchenko
A. Voitenok

Summary. Despite the progress in dental care, the treatment of inflammatory periodontal diseases remains challenging due to the high recurrence rate. The prevalence of periodontitis is 85–98 % among the population, which makes it not only a medical but also a social problem. This disease is polygenic in nature, and its development in predisposed individuals is due to both genetic, behavioral, and environmental factors. This is especially true in situations where orthopedic treatment is necessary, requiring rapid and effective oral sanitation, especially before extensive dental treatment. Modern local forms of medicines (films, therapeutic plates) have a limited duration of action and low accuracy. Therefore, an important task is to optimize the treatment of periodontitis by increasing the effectiveness and purposefulness of the drug effect. The use of individual vacuum compression mouthguards with areas for local drug placement allows for more accurate and prolonged drug delivery to the lesion site. This helps to shorten the duration of treatment, reduce costs, and prevent complications such as gum recession and inflammation around the prepared teeth. The development and implementation of new therapeutic and orthopedic approaches in the complex treatment of periodontitis are becoming of great practical importance for improving the quality of prosthetics and preventing complications.

Keywords: periodontal disease, inflammation, drugs, orthopedic treatment, dissection.

Турбин Андрей Валерьевич
Кандидат медицинских наук, врач-стоматолог, доцент, Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского
avturbin1973@mail.ru
Пьянзина Анна Владимировна
Кандидат медицинских наук, врач-стоматолог, доцент, Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского
megakafedra@gmail.com
Немсцверидзе Яков Элгуджович
Врач-стоматолог, Специалист научного отдела, Московский медицинский университет «Реавиз»; Врач-клинический ординатор, Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского
9187751@gmail.com
Полиданов Максим Андреевич
Специалист, ассистент, ЧУОО ВО Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург
maksim.polidanoff@yandex.ru
Андрущенко Артём Андреевич
Московский медицинский университет «Реавиз»
andrushchenko_artem@mail.ru
Войтенок Анастасия Александровна
Московский медицинский университет «Реавиз»
voitenook@mail.ru

Аннотация. Несмотря на прогресс в стоматологической помощи, лечение воспалительных заболеваний пародонта остается сложной задачей из-за высокой частоты рецидивов. Распространенность пародонтита составляет 85–98 % среди населения, что делает его не только медицинской, но и социальной проблемой. Данное заболевание носит полигенный характер, а его развитие у предрасположенных лиц обусловлено как генетическими, так и поведенческими и экологическими факторами. Это особенно актуально в ситуациях, когда необходима ортопедическое лечение, требующей быстрой и эффективной санации полости рта, особенно перед обширным одонтопрепарированием. Современные местные формы лекарств (пленки, лечебные пластины) имеют ограниченную продолжительность действия и низкую точность. Поэтому важной задачей становится оптимизация терапии пародонтита за счет повышения эффективности и целенаправленности лекарственного воздействия. Применение индивидуальных капп, изготовленных методом вакуумной компрессии, с зонами для локального размещения препаратов позволяет достичь более точной и продолжительной доставки лекарств в очаг поражения. Это способствует сокращению сроков лечения, снижению затрат и предупреждения осложнений, таких как рецессия десны и воспаление вокруг препарированных зубов. Разработка и внедрение новых терапевтических и ортопедических подходов в комплексном лечении пародонтита приобретают важное практическое значение для повышения качества протезирования и профилактики осложнений.

Ключевые слова: пародонт, воспаление, препараты, ортопедическое лечение, препарирование.

Введение

Обеспечение оптимального состояния пародонта представляет собой фундаментальный этап в алгоритме подготовки пациентов к ортопедическому лечению, поскольку именно здоровье опорных тканей определяет не только функциональную эффективность, но и долгосрочную прогнозируемость зубных протезов [1]. Согласно современным концепциям биологической совместимости протезных конструкций, пародонтальная ткань выступает в качестве динамической биомеханической системы, способной адаптироваться к изменяющимся нагрузкам лишь при условии отсутствия воспалительного компонента и сохранения целостности соединительнотканного прикрепления [2]. Эпидемиологические исследования демонстрируют прямую корреляцию между исходным состоянием пародонта и сроком службы ортопедических конструкций: при наличии хронического генерализованного пародонтита средней степени тяжести средняя продолжительность эксплуатации несъёмных протезов сокращается на 40–60 % по сравнению с пациентами с клинически здоровым пародонтом [3].

Недостаточная санация тканей протезного ложа до начала ортопедического этапа создаёт предпосылки для формирования патологического триадного комплекса: механическое раздражение края протеза, застой микроциркуляции в десневом крае и колонизация патогенной микрофлоры в субгингивальной зоне [4]. Клинически это проявляется в виде локализованного обострения хронического пародонтита или развития острого воспалительного процесса непосредственно в зоне контакта протезной конструкции с мягкими тканями [5]. Наиболее частыми осложнениями становятся прогрессирующая рецессия десны в области опорных зубов (выявляется у 68 % пациентов с неадекватной предварительной подготовкой в течение первых 18 месяцев после протезирования), образование десневых «карманов» вследствие травматического воздействия края коронки, а также развитие вторичной окклюзионной травмы из-за неравномерного распределения жевательной нагрузки [6, 7].

Особую клиническую значимость приобретает проблема развития периимплантита у пациентов с ортопедическими конструкциями на имплантатной основе при наличии нелеченного пародонтита на естественных зубах [8]. Механизм «кросс-контаминации» пародонтопатогенных штаммов (в первую очередь Porphyromonas gingivalis, Tannerella forsythia, Treponema denticola) от естественных зубов к имплантатам подтверждён молекулярно-генетическими исследованиями и объясняет в 3,2 раза более высокий риск потери имплантата у пациентов с активным пародонтитом по сравнению с контрольной группой [9, 10]. Статистические данные многоцентровых исследований свидетельствуют, что до 45 % случаев преждевременной утраты опорных зубов под мостовидными протезами напрямую связаны с прогрессированием пародонтальной патологии, возникшей или обострившейся после протезирования [11].

Комплексная подготовка пародонта к ортопедическому лечению должна включать не только устранение воспалительного процесса, но и восстановление анатомо-функциональных предпосылок для стабильной фиксации протеза [12]. Это предполагает выполнение следующих этапов: профессиональная гигиена с удалением над- и субгингивальных зубных отложений, антисептическая обработка пародонтальных карманов, при необходимости — хирургическое лечение (вектор-терапия, открытый кюретаж, направленная тканевая регенерация), а также коррекция архитектоники десневого края методами пластических операций [13, 14]. Критерием готовности пародонта к протезированию служит стабилизация клинических показателей в течение не менее 3 месяцев: глубина зондирования ≤3 мм, отсутствие кровоточивости при зондировании (индекс Силнеса-Лёе ≤10 %), отсутствие подвижности зубов выше физиологической нормы [15].

Экономический аспект также требует внимания: затраты на предварительную пародонтологическую подготовку окупаются за счёт снижения частоты ремонта и замены протезов. Расчёты показывают, что каждый вложенный рубль в санацию пародонта до протезирования позволяет сэкономить 4,7 рубля на повторных ортопедических вмешательствах в течение 5 лет наблюдения [16]. Более того, пациенты с полноценно подготовленным пародонтом демонстрируют на 35 % более высокую субъективную удовлетворённость результатом протезирования, что напрямую влияет на приверженность лечению и соблюдение рекомендаций по гигиене [17].

Современный подход к планированию ортопедического лечения предполагает обязательное участие пародонтолога на этапе диагностики и составления плана лечения [18]. Междисциплинарная команда (стоматолог-ортопед, пародонтолог, гигиенист) позволяет минимизировать риски осложнений и обеспечить биологическую долговечность протезных конструкций [19]. Внедрение протоколов «пародонтологического скрининга» перед любым видом ортопедического вмешательства становится стандартом доказательной стоматологии и отражает переход от реактивной к проактивной модели управления здоровьем опорных тканей [20]. Только при условии достижения биологической стабильности пародонта возможно формирование предсказуемого и долгосрочного результата ортопедической реабилитации.

Цель

Провести подготовку больного с обострением острого локализованного пародонтита к протезированию ис-

пользуя индивидуальную каппу, изготовленную методом вакуумного прессования.

Материалы и методы

На кафедре ортопедической стоматологии ГБУЗ МОНИКИ им. М.Ф. Владимирского в целях оптимизации сроков подготовки к больным к протезированию разработана и применяется индивидуальная каппа, полученный по технологии вакуумного прессования, допускает применение в составе комплексной терапии локализованных форм пародонтита. Его использование обеспечивает пролонгированное терапевтическое воздействие (свыше 60 минут) на слизистую десны в зоне поражённых зубов за счёт сочетанного антибактериального, противовоспалительного, эпителизирующего и регенераторного эффекта. На данное изобретение получен патент на полезную модель [13]. Суть использования данной каппы состоит в возможности обеспечения депонирования лечебного препарата на своей поверхности в течение определенного времени. Эффективность применения обеспечивается за счет возможности точного подбора каппы так как индивидуализируя ее конструкцию под анатомические особенности тканей полости рта определенно взятого больного с острым или обострением хронического очагового пародонтита мы создаем оптимальные условия для максимально продолжительного действия препарата во многом за счет удобства пользования каппой. Разработанная каппа отличается высокой функциональностью: она не нарушает процесс жевания и артикуляцию речи, что позволяет пациенту сохранять привычный образ жизни и минимизировать дискомфорт в ходе терапии. Конструкция изготавливается по технологии вакуумного прессования из биосовместимых полимерных пластин, толщина которых подбирается индивидуально в зависимости от протяжённости воспалительного очага. В специально сформированное пространство над поражённым участком десны вводится лечебное средство в жидкой, гелевой или мазевой форме в строго контролируемом объёме на заданный терапевтический интервал. Наличие изолированной лечебной камеры обеспечивает универсальность применения — как для купирования острого воспаления, так и в качестве защитной повязки в послеоперационном периоде после хирургических вмешательств на тканях пародонта. Важным моментом в подготовке тканей протезного ложа перед использованием каппы является проведение профессиональной гигиены полости рта, так как у пациентов с неудовлетворительной гигиеной антибактериальная терапия не окажет должного эффекта [2, 4, 7, 10].

Поскольку основной целью, которая стояла перед разработкой каппы, была оптимизация процесса изготовления, исключая лабораторный этап, это позволило снизить энергетические затраты, сократить время и позволить врачам стоматологом овладеть новой эффективной технологией подготовки больных с заболеваниями пародонта к ортопедическому лечению. Конструкция каппы предусматривает дифференцированный подход к формированию её элементов в зависимости от клинической ситуации в полости рта. В зоне интактных зубов материал удаляется над окклюзионной поверхностью и частично с прилегающих вестибулярной и оральной поверхностей вплоть до уровня цементно-эмалевого соединения, что обеспечивает полноценный контакт зубных рядов при смыкании и сохранение функции жевания.

В проекции патологического очага пародонта создаётся изолированная лечебная камера за счёт формирования отступа от поверхности зуба и десны глубиной от 1 до 10 мм как с вестибулярной, так и с оральной стороны. Данное пространство служит резервуаром для размещения лекарственного средства (жидкость, гель или мазь) и обеспечивает его удержание непосредственно в зоне воспаления на протяжении заданного терапевтического интервала. Наличие анатомически адаптированного ложа для зубов гарантирует стабильную фиксацию конструкции без смещения в процессе эксплуатации.

Методика производства индивидуальной терапевтической каппы для локального лечения очагового пародонтита включает последовательность этапов, выполняемых в первое посещение пациента. Сначала получают альгинатный оттиск поражённого зубного ряда (верхней или нижней челюсти). На основе оттиска изготавливают диагностическую гипсовую модель, воспроизводящую анатомию зубов и десневого края. Далее на гипсовом слепке в вакуумном термопрессе формируют базовую каппу путём термоформования биосовместимой полимерной пластины толщиной 1 мм, обеспечивая плотное прилегание материала к поверхности модели. Полученная заготовка служит основой для последующей модификации конструкции с формированием лечебной камеры в проекции воспалительного очага. Далее отмечают будущую зону расположения лечебного препарата на модели (Рисунок 1) и обрезают изготовленную каппу по этим границам (Рисунок 2). На модели остается локальный участок каппы, соответствующий зоне действия препарата. Затем с данной гипсовой модели снимают альгинатный оттиск (Рисунок 3) и получают гипсовую модель (Рисунок 4).

На модели прессуют пластину толщиной 0,5 мм. Готовую каппу обрезают по заранее отмеченным границам. Поскольку граница каппы проходит по шейкам зубов, пациент имеет возможность принимать пищу без ограничений в процессе лечения (Рисунок 5). Окончательно изготовленная каппа методом вакуумного прессования. В области 1.1,1.2,1.3 зубов имеется пространство равное по толщине подготовленной пластине для вакуумного



Рис. 1. Нанесение границ действия препарата

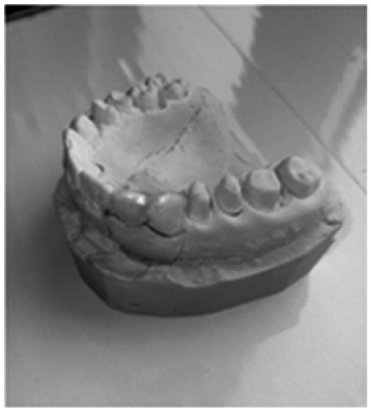


Рис. 2. Вырезание участка каппы в области 11,12, 13 зубов

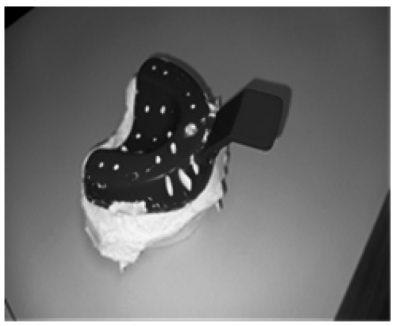


Рис. 3. Снятие оттиска с модели



Рис. 4. Полученная модель

прессования между альвеолярным отростком и каппой которое впоследствии будет заполнено лечебным препаратом.

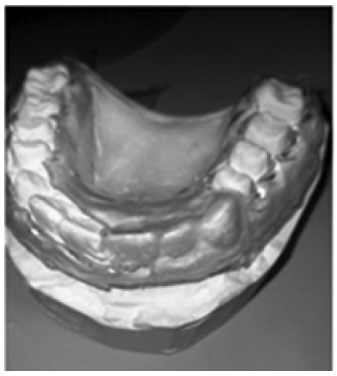


Рис. 5. Окончательно изготовленная каппа

Результаты исследования

В ходе пилотного клинического исследования индивидуальные терапевтические каппы были изготовлены и применены у 14 пациентов в возрасте от 30 до 70 лет с клиническими проявлениями локального воспаления тканей пародонта. В структуре диагнозов преобладал острый катаральный гингивит (11 случаев), у 4 пациентов диагностирован острый локализованный пародонтит (у одного пациента отмечалось сочетание двух состояний).

Терапевтическая эффективность конструкции проявилась уже на ранних этапах лечения: у 13 из 14 пациентов (92,9 %) отмечена значимая регрессия воспалительных явлений (гиперемия, отёчность десны) к 2–3 суткам терапии. У 7 пациентов (50 %) объёмная составляющая воспаления (отёк) полностью купировалась к 3–5 дню. В контрольной группе из 6 пациентов с острым катаральным гингивитом, получавших традиционное лечение самоклеящимися повязками и резорбируемыми пластинами на фоне подготовки к ортопедической реабилитации, при контрольном осмотре через 7 дней сохранялись субъективные симптомы воспаления — жжение и болезненность в области поражённого участка.

Заключение

Применение разработанной индивидуальной каппы сокращает сроки санации пародонта перед ортопедическим лечением за счёт:

- сохранения окклюзионной высоты благодаря вырезам над жевательными поверхностями интактных зубов, что обеспечивает быструю адаптацию пациента;
- возможности непрерывного ношения во время разговора и приёма пищи без существенного снижения комфорта и качества жизни;
- отсутствия необходимости в лабораторном этапе — каппа изготавливается непосредственно в стоматологическом кабинете за 25–30 минут с использованием вакуумного прессования на диагностической модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адамчик А.А., Арутюнов А.В. Эффективность применения мягкой пластмассы в конструкции базиса бюгельного протеза на фоне иммунокорректора в комплексном лечении при пародонтите // Кубанский научный медицинский вестник. — 2013. — № 6.
2. Березин Н.В. Применение витаминно-минерального комплекса и антибактериальных гелей, ополаскивателя и зубной пасты в лечении воспалительных заболеваний пародонта / Н.В. Березин, Е.Н. Силантьева, С.М. Кривонос // Пародонтология. —1014. — No 4. — С. 72–75.
3. Березина Н.В. Применение современных средств в комплексной терапии воспалительных заболеваний пародонта. / Н.В. Березина, Е.Н. Силантьева, С.М. Кривонос // Стоматология для всех. — 2017. — № 2(79). — С. 26–30.
4. Вагнер В.Д. Оценка эффективности профилактических мероприятий и профессиональной гигиены при лечении заболеваний пародонта / В.Д. Вагнер, З.Э. Ревазова // Вестник Национального медико-хирургического Центра им. Н.И. Пирогова — 2015. — № 3 — С. 95–102.
5. Возная И.В. Клиническая оценка влияния ортопедического лечения на ткани пародонта // Вестник проблем биологии и медицины. — 2015. — № 2 (1). — С. 336–339.
6. Горбунова И.Л. Обоснование эффективности местной антибактериальной терапии в комплексном лечении больных хроническим генерализованным пародонтитом / И.Л. Горбунова, И.П. Ивашкеева, К.А. Ефименко, Д.О. Колобова, А.А. Баранник, А.С. Деревянко // Уральский медицинский журнал. — 2018. — № 1(156). — С. 34–38.
7. Грудянов А.И. Пародонтология: Избранные лекции. — М.: ОАО «Стоматология», 1997. — С. 32.
8. Грудянов А.И. Изучение эффективности геля на основе эфирных масел в комплексном лечении воспалительных заболеваний пародонта / А.И. Грудянов, Е.В. Фоменко // Пародонтология. — 2016. — Т. 3 (80). — С. 3842.
9. Еловикова Т.М. Применение антибактериальных препаратов при агрессивных формах пародонтита / Т.М. Еловикова, Е.Ф. Гайсина, А.С. Приходкин // Проблемы стоматологии. — 2019. — Т. 15. — № 1. — С. 10–15.
10. Еричев В.В. Клинико-лабораторная оценка эффективности применения пародонтологических инструментальных систем в комплексном лечении воспалительных заболеваний пародонта / В.В. Еричев, С.В. Мелехов, Т.В. Аксенова, Е.С. Овчаренко // Медицинский алфавит. — 2016.— Т. 3, No 21.— С. 20–23.
11. Зуб А.А. Оптимизация лечения хронического генерализованного пародонтита средней степени, автореферат
12. Игидбашян В.М. Современные подходы к вопросам комплексного лечения воспалительных заболеваний пародонта / В.М. Игидбашян, Л.А. Зюлькина, М.Н. Суворова, Г.В. Емелина и др. // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 5. — С. 299.
13. Индивидуальная каппа для лечения очагового пародонтита Патент RU 222 135 U1; опубл. 12.12.2023. Бюл. № 38
14. Колесников Л.Л.,. Арутюнов С.Д, Лебеденко И.Ю, Дегтярёв В.П.. Анатомия, физиология и биомеханика зубочелюстной системы: учебник — М.: ГЭОТАР Медиа, 2009. 304 с.
15. Овчаренко Е.С. Иммунологическая и микробиологическая оценка эффективности гигиены полости рта в комплексном лечении больных с воспалительными заболеваниями пародонта. / Е.С. Овчаренко, В.В. Еричев, Т.В. Аксенова, С.В. Мелехов. // Медицинский алфавит. — 2017. — № 3(24). — С. 38–41.
16. Орехова Л.Ю. Результаты клинических исследований по оценке эффективности лечебно-профилактических программ с зубными пастами и стоматологическими гелями у пациентов с заболеваниями пародонта / Л.Ю. Орехова, Е.В. Косова, А.А. Лукавенко, Я.В. Чмиленко, Е.С. Лобода, М.Л. Обоева, Н.Я. Яманидзе // Пародонтология. — 2017. — No 1. — С. 27–30.
17. Орехова Л.Ю. Системы локальной доставки лекарственных препаратов в пародонтологии / Л.Ю. Орехова, Т.В. Кудрявцева, Ю.С. Бурлакова // Пародонтология. — 2016. — Т. 1(78). — С. 34–39.
18. Сулайманова Р.Т., Полиданов М.А., Масляков В.В., Волков К.А. Гистология, эмбриология, цитология: учебное пособие — Санкт-Петербург: ЧУОО ВО «Университет «Реавиз». 2025; 117 с.
19. Юрищева А.Ю., Полиданов М.А., Масляков В.В., Волков К.А., Капралов С.В., Кашихин А.А., Цуканова П.Б. База данных для создания программы по связи микробиома ротовой полости и риску сердечно-сосудистых событий. Свидетельство о регистрации базы данных RU 2025623699, 08.09.2025. Заявка № 2025623281 от 28.07.2025.
20. Юрищева А.Ю., Полиданов М.А., Масляков В.В., Волков К.А., Цуканова П.Б., Капралов С.В., Кашихин А.А. Программа для связи микробиома ротовой полости с риском сердечно-сосудистых событий. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025683855, 09.09.2025. Заявка № 2025682669 от 31.07.2025.

© Турбин Андрей Валерьевич (avturbin1973@mail.ru); Пьянзина Анна Владимировна (megakafedra@gmail.com);
Немсцверидзе Яков Элгуджович (9187751@gmail.com); Полиданов Максим Андреевич (maksim.polidanoff@yandex.ru);
Андрущенко Артём Андреевич (andrushchenko_artem@mail.ru); Войтенок Анастасия Александровна (voitenook@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.48

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ АТРОФИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ТКАНЯХ ПРОТЕЗНОГО ЛОЖА У ПАЦИЕНТОВ С ПОЛНОЙ ПОТЕРЕЙ ЗУБОВ

A STUDY OF THE DYNAMICS OF ATROPHIC CHANGES IN THE TISSUES OF THE DENTURE BED IN PATIENTS WITH COMPLETE LOSS OF TEETH

A. Shtorina
T. Berezkina
S. Fischev
A. Sevastyanov
A. Klimov
S. Pavlova
M. Puzdyreva
M. Rozhkova

Summary. There is disagreement among researchers regarding the specific factors that determine the development of denture socket tissue atrophy in edentulous patients. Some scientists believe that the reduction in alveolar ridge height after tooth loss is a natural biological response, indicating a significant influence of biomechanical forces on bone physiology. Other studies suggest that reduced mechanical stress on the bone leads to a decrease in intraosseous stress and subsequent atrophy. The dynamics of alveolar ridge height reduction are largely determined by local effects associated with the functioning of the denture.

Keywords: orthopedics, complete tooth loss, mucosal atrophy, denture socket.

Шторина Анастасия Александровна
Кандидат медицинских наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
nastiya78@mail.ru
Березкина Татьяна Николаевна
Ассистент, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
mail332@mail.ru
Фищев Сергей Борисович
Доктор медицинских наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
super.kant@yandex.ru
Севастьянов Аркадий Владимирович
Доктор медицинских наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
ardy.dkr@mail.ru
Климов Андрей Геннадьевич
Доктор медицинских наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
pstom4@zdrav.spb.ru
Павлова Светлана Георгиевна
Кандидат медицинских наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
svetap_75@mail.ru
Пуздырева Маргарита Николаевна
Кандидат медицинских наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
seven-spb@yandex.ru
Рожкова Мария Геннадьевна
Кандидат медицинских наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
rozmaria2010@yandex.ru

Аннотация. Существует разногласие среди исследователей относительно того, какие именно факторы являются определяющими в развитии атрофии тканей протезного ложа у пациентов с полным отсутствием зубов. Некоторые ученые полагают, что уменьшение высоты альвеолярного отростка после потери зубов представляет собой естественную биологическую реакцию, свидетельствующую о значимом влиянии биомеханических сил на физиологию костной ткани. Согласно другим исследованиям, уменьшение механического воздействия на кость ведет к снижению внутрикостного напряжения и последующей атрофии. Динамика уменьшения высоты аль-

веолярного отростка в значительной степени определяется местными воздействиями, обусловленными функционированием зубного протеза.

Ключевые слова: ортопедия, полная потеря зубов, атрофия слизистой оболочки, протезное ложе.

Существует разногласие среди исследователей относительно того, какие именно факторы являются определяющими в развитии атрофии тканей протезного ложа у пациентов с полным отсутствием зубов. Некоторые ученые полагают, что уменьшение высоты альвеолярного отростка после потери зубов представляет собой естественную биологическую реакцию, свидетельствующую о значимом влиянии биомеханических сил на физиологию костной ткани [1, 2]. Согласно другим исследованиям, уменьшение механического воздействия на кость ведет к снижению внутрикостного напряжения и последующей атрофии, что является ключевым фактором, обуславливающим резорбцию альвеолярного отростка в течение первого года после потери зубов.

Динамика уменьшения высоты альвеолярного отростка в значительной степени определяется местными воздействиями, обусловленными функционированием зубного протеза [3, 4]. Перестройка костных структур после потери зубов зависит от силы и продолжительности жевательной нагрузки на подлежащие ткани протезного ложа от базисов протезов.

Известно, что на рельеф альвеолярного отростка влияют методы и особенности экстрации зубов. Операция удаления зуба, проведенная травматично способствует ухудшению процессов заживления как со стороны слизистой оболочки, так и костной ткани. Наиболее часто это происходит, когда при удалении зуба повреждается межкорневая перегородка или несколько стенок лунки. Экстракция зубов с разрушенной коронковой частью нередко сопровождается травматизацией краев альвеолы, что в дальнейшем может способствовать формированию экзостозов. Постэкстракционная атрофия альвеолярного отростка достигает 40–60 %, характеризуясь при этом его сужением в апикальном направлении [7, 8]. Эти изменения не зависят от локализации и количества удаленных зубов. По данным ряда авторов, ускорению регенерации раны, особенно после множественного удаления зубов, способствует непосредственное протезирование с использованием съемных протезов [7–9].

Целью данного исследования было изучить влияние причин утраты зубов, режима протезирования (непосредственное или отсроченное), особенностей удаления зубов на степень и характер атрофии у пациентов с полным отсутствием зубов.

На основе анализа 105 клинических случаев (31 мужчина, 74 женщины) пациентов с полной адентией в возрасте 45–85 лет, было проведено всестороннее изучение анамнеза, этиологии и сроков потери зубов, а также продолжительности использования зубных протезов. В ходе работы оценивались интенсивность и локализация атрофии тканей протезного ложа, состояние слизистой оболочки (гиперемия, отек, «болтающийся гребень»). Дополнительно учитывалось состояние ортопедических конструкций.

Для изучения факторов, влияющих на эффективность полных съемных протезов (ПСП) мы анализировали морфофункциональные изменения в тканях протезного ложа. Степень и тип атрофии верхней и нижней челюсти оценивались по классификации И.М. Оксмана (1967).

Таблица 1 демонстрирует взаимосвязь между степенью атрофии тканей протезного ложа верхней и нижней челюсти у мужчин и женщин на этапе первичного обследования. На верхней челюсти у мужчин I и II степень атрофии встречается в 77,4 % случаев, а III и IV степень в 22,6 % наблюдений. Среди женщин I и II степень атрофии встречается в 64,9 % случаев, а III и IV — в 35,1 %. Однако эти различия недостоверны (χ^2=5,85; p>0,10).

На нижней челюсти у мужчин в 70,9 % случаев выявлена I и II степень атрофии, при этом у женщин этот вид атрофии встречается всего лишь в 41,9 % случаев. II, III и IV степень атрофии у женщин выявляется значитель-

Таблица 1.

Взаимосвязь между степенью атрофии тканей протезного ложа верхней и нижней челюсти у мужчин и женщин

Пол	Верхняя челюсть				χ^2	p
	I (n=25)	II (n=47)	III (n=11)	IV (n=22)		
Мужчины (n=31)	12 (38,7 %)	12 (38,7 %)	3 (9,7 %)	4 (12,9 %)	5,85	>0,10
Женщины (n=74)	13 (17,6 %)	35 (47,3 %)	8 (10,8 %)	18 (24,3 %)		
Пол	Нижняя челюсть				16,95	<0,001
	I (n=20)	II (n=33)	III (n=27)	IV (n=25)		
Мужчины (n=31)	13 (41,9 %)	9 (29,0 %)	3 (9,7 %)	6 (19,4 %)		
Женщины (n=74)	7 (9,5 %)	24 (32,4 %)	24 (32,4 %)	19 (25,7 %)		

но чаще — 32,4 %, 32,4 % и 25,7 % наблюдений соответственно.

Данные представленные выше показывают, что мужчины на нижней челюсти имеют более благоприятные условия для фиксации полных съемных протезов. У женщин на нижней челюсти фиксируется II, III и IV степень атрофии альвеолярной части в большинстве случаев, что вызывает сложности и уменьшает благоприятный исход при изготовлении ПСП. Различия достоверны.

Эта особенность связана с гормональным статусом женщин в сочетании с фоновой патологией.

Оценка типа атрофии рельефа альвеолярных частей на верхней и нижней челюстях при использовании полных съемных протезов выявила, что равномерный тип атрофии встречается чаще, чем неравномерный. В группе женщин неравномерный тип атрофии выявляется в 23,0 %, а у мужчин в 12,9 % случаев (таблица 2). Различия недостоверны.

Таблица 2.

Распределение типа атрофии тканей протезного ложа в зависимости от пола

Тип атрофии	n	Мужчины	Женщины	χ^2	p
Равномерный	84	27 (87,1 %)	57 (77,0 %)	0,83	>0,10
Неравномерный	21	4 (12,9 %)	17 (23,0 %)		
Всего	105	31 (100,0 %)	74 (100,0 %)	—	—

Изучение взаимосвязи возрастных параметров больных с полным отсутствием зубов и типами атрофии тканей протезного ложа выявило, что при равномерном типе атрофии средний возраст больных меньше, чем у больных с неравномерным типом атрофии.

Таблица 3.

Распределение типа атрофии тканей протезного ложа в зависимости от возраста

Показатель	Тип атрофии		t	p
	Равномерный (n=84)	Неравномерный (n=21)		
Возраст, годы	62,3±1,3	69,7±1,4	2,74	<0,007

Таким образом, при равномерном типе атрофии больные имеют средний возраст 62,3±1,3 года, при неравномерном типе атрофии средний возраст больных составляет 69,7±1,4 года. Данные различия достоверны.

Полученные данные свидетельствуют о том, что после потери зубов альвеолярный отросток на верхней челюсти и альвеолярные гребни нижней челюсти приобретают неравномерный тип атрофии в среднем через 8 лет.

Установлены достоверные различия между наличием экзостозов в зависимости от пола (табл. 4).

Таблица 4.

Частота встречаемости экзостозов у мужчин и женщин

Пол	Экзостозы		χ^2	p
	есть	нет		
Мужчины (n=31)	9 (29,0 %)	22 (71,0 %)	13,46	<0,001
Женщины (n=74)	2 (2,7 %)	72 (97,3 %)		

Исследования показали, что в группе мужчин экзостозы выявляются чаще, чем в группе женщин. Анализ взаимосвязи между наличием экзостозов и характером атрофии показал, что при неравномерном типе атрофии экзостозы выявлялись у 33,3 % больных, а при равномерном типе атрофии только в 4,8 % случаев (χ^2=11,74; p <0,001).

Наличие экзостозов у беззубых пациентов тесно связано со степенью атрофии тканей протезного ложа. В частности, на верхней и нижней челюстях костные выступы были наиболее распространены при выраженной атрофии IV степени, что может иметь значение для планирования протезирования (табл. 5).

При III и IV степени атрофии альвеолярного отростка нижней челюсти в 92,3 % случаев наблюдались гиперемия и отек слизистой оболочки под базисом протеза. Вероятно, это обусловлено неудовлетворительной фиксацией протеза, вызванной анатомическими особенностями протезного ложа.

Таблица 5.

Взаимосвязь между наличием экзостозов и выраженностью атрофии

Экзостозы	Верхняя челюсть				χ^2	p
	I	II	III	IV		
Отсутствуют (n=94)	23 (24,5 %)	45 (47,9 %)	10 (10,6 %)	16 (17,0 %)	8,74	=0,042
Наличие экзостозов (n=11)	2 (18,2 %)	2 (18,2 %)	1 (9,1 %)	6 (54,5 %)		
Экзостозы	Нижняя челюсть				13,68	<0,004
	I	II	III	IV		
Отсутствуют (n=95)	19 (18,9 %)	31 (33,7 %)	27 (29,5 %)	18 (17,9 %)		
Наличие экзостозов (n=10)	1 (18,2 %)	2 (20,0 %)	0 (0%)	7 (80,0 %)		

Выявлена корреляция между состоянием слизистой оболочки и выраженностью атрофических изменений в тканях протезного ложа нижней челюсти (табл. 6).

Таблица 6.

Взаимосвязь между состоянием слизистой оболочки и выраженностью атрофии на нижней челюсти

Состояние слизистой оболочки	Нижняя челюсть				χ2	p
	I (n=20)	II (n=33)	III (n=27)	IV (n=25)		
Без видимой патологии (n=92)	19 (20,7 %)	33 (35,9 %)	19 (20,6 %)	21 (22,8 %)	13,37	<0,005
Гиперемия, отек (n=13)	1 (7,7 %)	0 (0 %)	8 (61,5 %)	4 (30,8 %)		

Изучение состояния слизистой оболочки беззубых нижних челюстей в зависимости от выраженности атрофии достоверных различий не выявил (χ^2=4,32; p>0,1).

Установлено, что основными факторами, приводящими к экстракции зубов, являются осложнения кариеса, генерализованный пародонтит и травмы зуба. Исследование этиологии потери зубов среди обследованных пациентов показало, что в подавляющем большинстве случаев причиной является патология пародонта, а также кариес и его осложнения.

При сборе анамнеза пациентов с пародонтитом отмечается тенденция к посещению стоматолога преимущественно в фазе обострения заболевания, что приводило к удалению нескольких зубов одновременно. При этом пациенты, которым зубы удаляли по причине кариозного процесса и его осложнений, в основном проходили поэтапное удаление.

Выявлена взаимосвязь между причинами утраты зубов и степенью атрофии тканей протезного ложа в области верхней и нижней челюстей.

В таблице 7 представлено, что на верхней челюсти при утрате зубов вследствие кариеса и его осложнений I и II степень атрофии встречается чаще. Пациенты, которым зубы удаляли в результате патологии пародонта, имели чаще II степень атрофии, у 26,5 % пациентов выявляли IV степень атрофии (χ^2=12,38; p <0,008).

На нижней челюсти у большинства пациентов, которым зубы были удалены вследствие кариеса и его осложнений, чаще встречается I и II степень атрофии. У больных, утративших зубы в результате заболеваний пародонта, чаще выявляется II, III и IV степень атрофии (χ^2=17,58; p <0,001).

Полученные данные свидетельствуют о том, что патология пародонта является одним из факторов, которые являются причиной выраженной атрофии тканей протезного ложа у больных с полной утратой зубов. При тяжелом поражении пародонта в анамнезе, когда больным

Таблица 7.

Взаимосвязь между степенью атрофии тканей протезного ложа и причинами утраты зубов

Причина утраты	Степень атрофии челюсти			
	I	II	III	IV
Верхняя челюсть				
Кариес и его осложнения (n=26)	12 (46,2 %)	11 (42,3 %)	2 (7,7 %)	1 (3,8 %)
Патология пародонта (n=79)	13 (16,5 %)	36 (45,6 %)	9 (11,4 %)	21 (26,5 %)
Нижняя челюсть				
Кариес и его осложнения (n=26)	11 (42,3 %)	10 (38,5 %)	4 (15,4 %)	1 (3,8 %)
Патология пародонта (n=79)	9 (11,4 %)	23 (29,1 %)	23 (29,1 %)	24 (30,4 %)

не проводилось пародонтологическое лечение, полная утрата зубов сопровождается наиболее глубокими изменениями в костной ткани со значительным снижением высоты альвеолярного отростка.

Пациенты, которым зубы удаляли в результате кариеса и его осложнений, степень атрофических процессов в области альвеолярного отростка достоверно меньше. В данном случае слизистая альвеолярного отростка имеет большую плотность, менее подвижна, условия для протезирования имеют более благоприятный прогноз.

Изучение влияния причины утраты зубов на формирование типа атрофических процессов в тканях протезного ложа показал, что удаление зубов в результате заболеваний пародонта приводит к развитию неравномерной атрофии тканей протезного ложа, что представлено в таблице 8.

Таблица 8.

Характеристика атрофических процессов при удалении зубов в результате различных причин

Атрофия	Кариес и его осложнения	Заболевания пародонта	χ2	P
Равномерный тип (n=84)	24 (96,0 %)	60 (75,0 %)	4,02	=0,045
Неравномерный тип (n=21)	1 (4,0 %)	20 (25,0 %)		
Всего (n=105)	25	80		

Удаление зубов по причине кариеса и его осложнений приводит к равномерному типу атрофии в 96,0 % случаев. При удалении зубов вследствие пародонтита равномерный тип атрофии выявляется в 75,0 % наблю-

дений. Неравномерный тип атрофии при утрате зубов в результате кариеса и его осложнений выявлен в 4,0 % случаев, а при пародонтите — в 25,0 %.

Анализ влияния объема и травматичности хирургических вмешательств при удалении зубов показал, что поэтапная экстракция зубов значительно чаще (в 81,0 % случаев) ассоциируется с меньшей травматичностью по сравнению с одномоментным удалением нескольких зубов зубов (19,0 % случаев). Подробные данные представлены в таблице 9.

Таблица 9.

Взаимосвязь между режимом удаления зубов и травматичностью проводимых манипуляций

Характер удаления	Режим удаления		χ2	p
	постепенно	одномоментно		
Нетравматично (n=84)	68 (81,0 %)	16 (19,0 %)	10,60	<0,001
Травматично (n=21)	9 (42,9 %)	12 (57,1 %)		

Экстракция зубов проводится менее травматично, при постепенном удалении, в 42,9 % случаев, во время одномоментного удаления нескольких зубов (более травматично) — в 57,1 % наблюдений.

Анализ характера удаления в зависимости от причины утраты зубов, показал, что нетравматичный характер удаления зубов в большинстве наблюдений выявлен в результате утраты зубов вследствие заболеваний пародонта (82,1 %) (табл. 10).

Таблица 10.

Влияние причины утраты зубов на характер удаления

Характер удаления	Причина удаления		χ2	p
	кариес	пародонтит		
Нетравматично (n=84)	15 (17,9 %)	69 (82,1 %)	24,26	<0,001

При оценке сроков протезирования ПСП и характера атрофии альвеолярных отростков в области верхней и нижней челюсти равномерная атрофия встречается с одинаковой частотой, как в случае непосредственного протезирования, так и при проведении отсроченного протезирования (табл. 11).

Неравномерный тип атрофии чаще наблюдается при непосредственном протезировании, когда иммедиат-протез накладывается сразу после операции удаления зуба (81,0 %).

При анализе степени фиксации полных съемных протезов у пациентов с разными степенями атрофии беззубых челюстей установлено, что при чем сильнее степень атрофии верхней и нижней челюсти, тем более плохое

Таблица 11.

Взаимосвязь между режимом протезирования и типом атрофии тканей протезного ложа при полном отсутствии зубов

Характер атрофии (n=105)	Режим протезирования		χ2	p
	непосредственное	отсроченное		
Равномерный тип (n=84)	43 (51,2 %)	41 (48,8 %)	4,92	=0,027
Неравномерный тип (n=21)	17 (81,0 %)	4 (19,0 %)		

качество фиксации полных съемных протезов у обследуемых больных (табл. 12).

Таблица 12.

Оценка фиксации полных съемных протезов в зависимости от степени атрофии тканей протезного ложа на верхней и нижней челюсти у пациентов с адентией

Качество фиксации	Верхняя челюсть				χ2	p
	I (n=25)	II (n=47)	III (n=11)	IV (n=22)		
Хорошее (n=40)	12 (30,0 %)	21 (52,5 %)	2 (5,0 %)	5 (12,5 %)	5,96	p>0,10
Плохое (n=65)	13 (20,0 %)	26 (40,0 %)	9 (13,8 %)	17 (26,2 %)		
Качество фиксации	Нижняя челюсть				9,23	=0,034
	I (n=20)	II (n=33)	III (n=27)	IV (n=25)		
Хорошее (n=39)	9 (23,1 %)	18 (46,1 %)	6 (15,4 %)	6 (15,4 %)		
Плохое (n=66)	11 (16,7 %)	15 (22,7 %)	21 (31,8 %)	19 (28,8 %)		

На верхней челюсти плохая фиксация наблюдалась при II и IV степени атрофии в 66,2 % случаев, при I и III степени в 33,8 % случаев. Различия недостоверны.

На нижней челюсти плохая фиксация в большинстве наблюдений выявлена при III и IV степени атрофии (60,6 % больных), при II степени атрофии в 22,7 % случаев, при I степени атрофии у 16,7 % пациентов.

Таким образом, плохая фиксация протезов при полном отсутствии зубов закономерно встречается в случаях выраженной атрофии альвеолярного гребня на нижней челюсти, что согласуется с данными ряда авторов (Свирин Б.В., 1998; Марков Б.П., 2005).

Выводы

1. Исследование атрофии тканей протезного ложа в верхней и нижней челюстях выявило половые различия: у женщин атрофия II, III и IV степени в области нижней челюсти наблюдается чаще, чем у мужчин. В группе мужчин на нижней челюсти выявляли большинстве случаев I и II степень атрофии. Полученные данные связаны с гормональной перестройкой женского организма в период менопаузы, влиянием желез внутренней секреции на фосфорно-кальциевый обмен, уменьшением резистентности тканей к экзогенным факторам.
2. Возраст пациентов с полным отсутствием зубов, имеющим равномерный тип атрофии моложе, чем у обследуемых с неравномерным типом атрофии. Средний возраст больных, имеющих равномерный тип атрофии 62,3±1,3 года, а у пациентов с неравномерным типом атрофии 69,7±1,4 года. Полученные данные указывают на то, что под действием жесткого базиса протеза, механической нагрузки на ткани под протезом происходит локальная перегрузка участков протезного ложа. Таким образом, рельеф тканей протезного ложа со временем имеет более неравномерный тип атрофии.
3. Наиболее выраженный характер атрофии у пациентов с полным отсутствием зубов встречается, когда причиной их удаления были заболевания пародонта. Успех протезирования, итогом которого является хорошая фиксация и стабилизация протезов у таких пациентов значительно хуже.
4. На нижней челюсти у пациентов с полным отсутствием зубов, когда причиной их удаления были кариес и его осложнений, в большинстве наблюдений встречалась I и II степень атрофии.
5. Непосредственное накладывание протеза после операции удаления зуба с использованием иммедиат-протезов на раневую поверхность приводит к формированию неравномерного типа атрофических процессов в тканях протезного ложа при полном отсутствии зубов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов Б.Л., Гапаненко Т.Г. Частота альвеолита после операции удаления зуба. Стоматология. 1990;69(5): С. 81–82. Available from: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=2072-0297
2. Робустова Т.Г. Имплантация зубов (хирургические аспекты): Руководство для врачей. М.: Медицина, 2003:407.
3. Севастьянов А.В., Рожкова М.Г., Фищев С.Б., Лепилин А.В., Орлова И.В. и др. Обоснование безэкстракционных методов ортодонтического лечения пациентов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и технические науки. 2021; №8, с.218–223. https://doi.org/10.37882/2223-2966.2021.08.34.
4. Фищев С.Б., Шторина А.А., Климов А.Г., Рожкова М.Г., Павлова С.Г. и др. Особенности использования стекловолоконных шинирующих материалов при подвижности зубов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Естественные и технические науки. 2024; №4/2, с.205–208. https://doi.org/10.37882/2223-2966.2024.4-2.39
5. Шибенко В.А. Функциональное движение при получении слепков с беззубых челюстей при разной степени атрофии альвеолярных отростков: автореф. дис. … канд. мед. наук. М., 1992:21–28.
6. Шторина А.А. Факторы, влияющие на сроки функционирования полных съемных протезов. Институт стоматологии. 2009;42(1):52–53. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=2073-6460.
7. Шторина А.А., Субботин Р.С., Фищев С.Б., Шишко Т.В., Севастьянов А.В. и др. Оценка состояния тканей протезного ложа и функции жевания у пациентов с полным отсутствием зубов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и технические науки. 2022; №7, с.218–223. https://doi.org/10.37882/2223-2966.2022.07.40.
8. Шторина А.А., Пуздырева М.Н., Рожкова М.Г., Фищев С.Б., Севастьянов А.В. и др. Влияние общих и местных факторов на сроки адаптации к полным съемным протезам // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2023; №3, с.254–260. https://doi.org/10.37882/2223-2966.2023.03.42.
9. Fischev S.B., Puzdyryova M.N., Dmitrienko S.V., Domenyuk D.A., Kondratyuk A.A. Morphological features of dentofacial area in peoples with dental arch issues combined with occlusion anomalies. Archiv EuroMedica. 2019; 9(1): 162–163. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=2199-885X.

© Шторина Анастасия Александровна (nastiya78@mail.ru); Березкина Татьяна Николаевна (mail332@mail.ru);
Фищев Сергей Борисович (super.kant@yandex.ru); Севастьянов Аркадий Владимирович (ardy.dkr@mail.ru);
Климов Андрей Геннадьевич (pstom4@zdrav.spb.ru); Павлова Светлана Георгиевна (svetap_75@mail.ru);
Пуздырева Маргарита Николаевна (seven-spb@yandex.ru); Рожкова Мария Геннадьевна (rozmaria2010@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

Наши авторы

Afanasyev V. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, RTU MIREA

Andreev V. — Bauman Moscow State Technical University

Andrushchenko A. — Moscow Medical University «Reaviz»

Asaliev I. — Post-graduate student, Moscow City University

Azab M. — Graduate student, ITMO University, Saint Petersburg

Belova E. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Medical Sechenov University; Moscow Medical University Reaviz

Belova M. — psychiatrist, head of the branch «V.A. Gilyarovsky Psychiatric Hospital» of the Moscow State Medical University, «Psychiatric Clinical Hospital No. 4 named after P.B. Gannushkin», Moscow

Berezkina T. — Assistant, Saint Petersburg State Pediatric Medical University

Biryukov K. — Candidate of Veterinary Sciences, Moscow State Academy of Veterinary Medicine, and Biotechnology – MBA named after K.I. Scriabin

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

Bryutova S. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Bulekbaev D. — Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, A.F. Mozhaysky Military Space Academy

Bulekova E. — RUDN University, Moscow

Burygina L. — Candidate of Medical Sciences, Chief Physician, Moscow Psychiatric Clinical Hospital No. 4 named after P.B. Gannushkin, Moscow

Cheremisin A. — Candidate of Geographical Sciences, Associate professor, Polar State University N.M. Fedorovsky, Norilsk

Chernobrovkina T.— Doctor of Medical Sciences, Professor, Federal State Budgetary Institution Federal Scientific, and Clinical Center for Specialized Types of Medical Care and Medical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Moscow

Our authors

Chernysheva E. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Astrakhan State Medical University

Chesalov A. — Candidate of Sciences in Technology, CEO of Atlansis Software Systems LLC, Tver

Dadabaev G. — Candidate of Medical Sciences, Doctor, A.N. Bakulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery

Davidyan L. — Doctor of Medical Sciences, Professor, State Educational Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Dobrynina T. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow City University

Dzhalmukhambetova E. — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Caspian Institute of Sea and River Transport named after Gen.-Adm. F.M. Apraksin branch, FSBEI HE VSUWT, Astrakhan

Dzhanibekova Sh. — Candidate of Medical Sciences, Assistant Professor, Saint Petersburg State Pediatric Medical University

Efetov V. — oncologist, LLC Genesis Clinic, Simferopol

Fischev S. — Doctor of Medical Sciences, Professor, St. Petersburg State Pediatric Medical University

Gaidukov S. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Saint Petersburg State Pediatric Medical University

Goldovsky Ya. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Russian University of Transport (MIIT), Moscow

Golushko V. — Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Goryachkin B. — candidate of technical Sciences, associate Professor, Moscow State Technical University named Bauman

Guliyeva G. — radiotherapist, Medical Radiological Research Center named after A.F. Tsyb — branch of the National Medical Research Radiological Center

Ichmelyan A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, State Educational Institution of Higher Professional Education Ulyanovsk State University

Ignatova E. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, St. Petersburg State Maritime Technical University

Igumnov S. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow

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, Moscow, Psychiatric Clinical Hospital No. 4 named after P.B. Gannushkin, Moscow

Ivanov S. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director of the Medical Radiological Research Center named after A.F. Tsyb - branch of the National Medical Research Radiological Center; Peoples' Friendship University of Russia

Kantalinskiy-Rodin A. — Director Directorate, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow

Kaprin A. — Doctor of Medical Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, General Director of the NMIC of Radiology; Peoples' Friendship University of Russia; P.A. Herzen Moscow Institute of Medical Sciences — branch of the Federal State Budgetary Institution NMIC of Radiology

Kapterev A. — Doctor of Pedagogical Sciences, Doctor of Social Sciences, Professor, Moscow City University

Kardashian R. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

Kartashov M. — Associate Professor, Caspian Institute of Sea and River Transport named after Gen.-Adm. F.M. Apraksin branch, FSBEI HE VSUWT, Astrakhan

Kasatkina S. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Astrakhan State Medical University

Katkova A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, State Educational Institution of Higher Professional Education Perm State Medical University named after Academician E.A. Wagner

Khakimov Kh. — Doctor, A.N. Bakulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery

Kharchenko D. — Altai State Pedagogical University, Barnaul

Klimin P. — Graduate student, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Klimov A. — Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Saint Petersburg state pediatric medical University

Kochina A. — Resident, Federal State Budgetary Institution Federal Scientific, and Clinical Center for Specialized Types of Medical Care and Medical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Moscow

Kogan A. — Moscow Medical University Reaviz

Komarov I. — Postgraduate student, All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Kondratyuk M. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Federal State Budgetary Institution Federal Scientific, and Clinical Center for Specialized Types of Medical Care and Medical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Moscow

Konovalova M. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Saint Petersburg State Pediatric Medical University

Korendyasev S. — Post-graduate student, Moscow City University

Korichkina L. — Doctor of Sciences in Medicine, Professor, Tver State Medical University

Korotkih I. — Doctor of Sciences in Medicine, Professor, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko

Korotkiy I. — Postgraduate student, Russian State University for the Humanities, Moscow

Korzhuk V. — Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg

Kostyuk G. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Chief Physician, Moscow State Medical University; Psychiatric Clinical Hospital No. 1 named after N.A. Alekseev, Moscow

Krez K. — Graduate Student, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Krikunova L. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Medical Radiological Research Center named after A.F. Tsyb — branch of the National Medical Research Radiological Center

Kucherov V. — Candidate of Medical Sciences, Medical Radiological Research Center named after A.F. Tsyb - branch of the National Medical Research Radiological Center

Kunin N. — Senior Lecturer, RTU MIREA

Kurdynko L. — Candidate of Medical Sciences, Assistant Professor, Saint Petersburg State Pediatric Medical University

Kurtash N. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Leshcheva M. — Assistant, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko

Lomakin A. — Volgograd State Technical University; Volgograd State Medical University

Mkrtchyan L. — Doctor of Medical Sciences, Medical Radiological Research Center named after A.F. Tsyb — branch of the National Medical Research Radiological Center

Molodyakov S. — Doctor of Technical Sciences, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Morozov A. — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, A.F. Mozhaysky Military Space Academy

Muratova T. — Moscow Medical University Reaviz

Mysakov N. — Post-graduate student, Moscow City University

Nemstsveridze Ya. — Dentist, Specialist, Moscow Medical University «Reaviz»; Clinical Resident, Moscow Regional Scientific Research Clinical Institute named after M.F. Vladimirsky

Nikiforov I. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Federal State Budgetary Institution Federal Scientific, and Clinical Center for Specialized Types of Medical Care and Medical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Moscow

Nosov K. — Postgraduate student, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg

Novikov E. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, RTU MIREA

Obrezan A. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Saint Petersburg State University; Group of companies My Medical Center, Saint Petersburg

Oganesyan A. — Volgograd State Technical University

Orlina M. — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Moscow Medical University Reaviz

Orlova I. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, St. Petersburg State Pediatric Medical University

Oshchepkov V. — candidate of medical sciences, chief physician, Sevastopol City Oncology Dispensary named after A.A. Zadorozhny, Sevastopol

Osinkina T. — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Orenburg State Medical University

Parfenov P. — Graduate student, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

Pavlova S. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Saint Petersburg State Pediatric Medical University

Pechorov A. — Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Astrakhan State Medical University

Petrosyan K. — Doctor of Medical Sciences, Doctor, A.N. Bakulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery

Petrykina A. — RUDN University, Moscow

Pisarev A. — Volgograd State Technical University

Pogosov G. — oncologist, LLC Genesis Clinic, Simferopol

Polidanov M. — Specialist, assistant, University of Higher Education «Reaviz», St. Petersburg

Polonikov I. — Graduate Student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg

Popov E. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Astrakhan State Medical University

Poselugina O. — Doctor of Sciences in Medicine, Professor, Tver State Medical University

Prokhorovich T. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Saint Petersburg State Pediatric Medical University

Prokopenko N. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Astrakhan State Medical University

Puzdyreva M. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Saint Petersburg State Pediatric Medical University

Pyanzina A. — Candidate of Medical Sciences, Dentist, Associate Professor, Moscow Regional Scientific Research Clinical Institute named after M.F. Vladimirsky

Raevskaya N. — RUDN University, Moscow

Rodionova N. — Candidate of Biological Sciences, Moscow State Academy of Veterinary Medicine, and Biotechnology — MBA named after K.I. Scriabin

Romashkova O. — Doctor of Engineering, Professor, Russian Presidential Academy of National Economy, and Public Administration, Moscow

Rozhkova M. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Saint Petersburg State Pediatric Medical University

Rudaeva E. — candidate of medical sciences, docent, Kemerovo State Medical University

Rybin E. — Candidate of Medical Sciences, St. Petersburg State Medical Institution "City Hospital of the Holy Martyr Elizabeth"

Samokhin M. — Laboratory assistant, MIREA — Russian Technological University, Moscow

Sannikov E. — Postgraduate student, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg

Savinkov I. — Adjunct, Federal State Budgetary Military Educational Institution of Higher Education Military Medical Academy named after S.M. Kirov

Semkin P. — Associate professor, Moscow State Technical University. N.E. Bauman

Seniatkin N. — Postgraduate Student, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow

Sevastyanov A. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Saint Petersburg State Pediatric Medical University

Shneiderov Y. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Shtorina A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Saint Petersburg State Pediatric Medical University

Sila A. — ITMO University, Saint Petersburg

Sultanova O. — Candidate of Medical Sciences, docent, Astrakhan State Medical University

Sultanova S. — Astrakhan State Medical University

Syachina E. — Senior Lecturer, Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev, Astrakhan

Taran V. — candidate of cultural studies, Laboratory for computer design and applied informatics SPLASH

Titov D. — Post-graduate student, Moscow City University

Tomashevsky A. — Moscow Medical University «Reaviz»

Toshpulotov A. — PhD in Business and Economics, Associate Professor, European International University, Technological University of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

Tretyakova I. — Doctor of medical sciences, Federal state budget educational institution of higher education North Ossetian state medical academy, Vladikavkaz

Tsaregorodtsev A. — Doctor of Technical Sciences, Professor, RUDN University, Moscow

Turbin A. — Candidate of Medical Sciences, Dentist, Associate Professor, Moscow Regional Scientific Research Clinical Institute named after M.F. Vladimirsky

Tyryshkin S. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov

Tyurin V. — Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Moscow State Academy of Veterinary Medicine, and Biotechnology – MBA named after K.I. Scriabin

Usenko E. — RUDN University, Moscow

Vazhov S. — Candidate of Biological Sciences, Associate professor, Altai State Pedagogical University, Barnaul

Vazhov V. — Doctor Of Agricultural Sciences, Professor, Altai State Pedagogical University, Barnaul

Vlasov A. — Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg

Voitenok A. — Moscow Medical University «Reaviz»

Volchkova L. — Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Moscow State Academy of Veterinary Medicine, and Biotechnology — MBA named after K.I. Scriabin

Yaskov M. — Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Gorno-Altai State University

Zabelina V. — Moscow State Technical University named Bauman

Zhelenkova M. — Assistant, Russian University of Transport (MIIT), Moscow

Zhuravleva M. — MIREA — Russian Technological University, Moscow

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).