ISSN 2223–2966

СОВРЕМЕННАЯ НАУКА:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 4–2 2026 (АПРЕЛЬ)

Учредитель журнала
Общество с ограниченной ответственностью
«НАУЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал издается с 2011 года.

Редакция:

Главный редактор
А.В. Царегородцев

Выпускающий редактор
Ю.Б. Миндлин

Верстка
М.А. Комарова

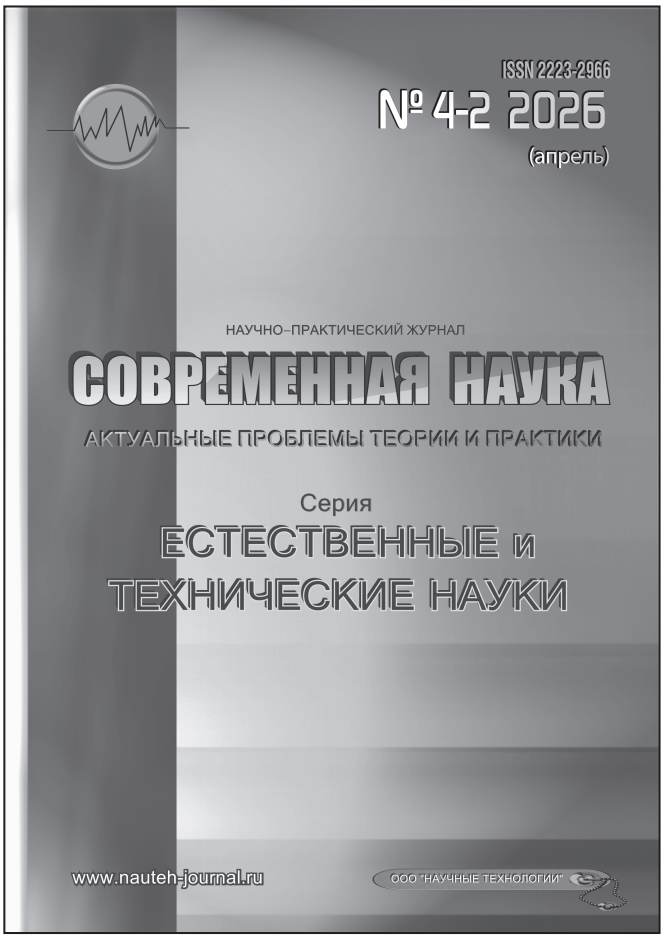
Подписной индекс издания
в каталоге агентства «Пресса России» — 80016

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

Научно-практический журнал

Scientific and practical journal

(ВАК — 1.1.2, 1.5.х, 2.3.х, 3.1.х)



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 29.04.2026 г. Формат 84х108 1/16
Печать цифровая Заказ № 0000 Тираж 2000 экз.

ISSN 2223-2966

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS

Общая биология

Борздыко Е.В., Долганова М.В., Авраменко М.В., Демихов В.Т., Чиграй О.Н. — Полиномиальная регрессионная зависимость биохимических показателей фолиопроб дендрофлоры и ИЗА в г. Брянск
Borzdyko E., Dolganova M., Avramenko M., Demikhov V., Chigray O. — Polynomial regression dependence of biochemical indicators of folio sample of dendroflora and AQI in Bryansk 6

Земскова Л.А., Нестеренко В.М., Авраменко М.В., Анищенко Е.И., Анищенко Л.Н. — К оценке экологической устойчивости интродуцированных и аборигенных видов по биохимическим признакам в условиях брянской области
Zemskova L., Nesterenko V., Avramenko M., Anishchenko E., Anishchenko L. — To the assessment of ecological stability of introduced and native species based on biochemical characteristics in the Bryansk region.....11

Нестеренко А.О., Целых Е.Д. — Формирование микроэлементного статуса подростков коренного и пришлого населения севера Хабаровского края под действием биогеохимических факторов среды
Nesterenko A., Tselih E. — Formation of the microelement status of the indigenous and alien adolescents on the north of Khabarovsky krai under the influence of biogeochemical environmental factors 18

Федорова О.И., Орлова Е.А., Ларина Е.Е. — Формирование волосяного покрова у сурков степных (Marmota bobak MULL., 1776) в постнатальном онтогенезе
Fedorova O., Orlova E., Larina E. — Formation of the hair cover in steppe marms (Marmota bobak MULL., 1776) in postnatal ontogenesis 24

Чирсков П.Р., Буй Тхи Лан Ань, Захарова И.Б. — Сходство фенотипических реакций Burkholderia pseudomallei в ответ на воздействие гипоксии и цефтазидима
Chirskov P., Bui Thi Lan An , Zakharova I. — Similarity of phenotypic responses of Burkholderia pseudomallei to hypoxia and ceftazidime exposure 27

Информатика, вычислительная техника и управление

Абаджян А.А. — Проектирование архитектуры и модуля геймификации образовательной платформы финансовой грамотности для младших школьников
Abadzhyan A. — Designing the architecture and gamification module of an educational platform for elementary school students' financial literacy.....31

Бажин В.Ю., Чан Дык Хиеу, Никитина Л.Н. — Методика поэтапной верификации и промышленного внедрения двухшкальной модели предиктивного автоматизированного управления агрегата бесслитковой прокатки алюминиевых сплавов
Bazhin V., Tran Duc Hieu, Nikitina L. — Methodology for the staged verification and industrial implementation of a dual-rate model for predictive automated control of an aluminum-alloy twin-roll casting and rolling unit 37

Бедняк С.Г., Шишкин А.В. — Безопасность на уровне изоляции транзакций: между теорией и практикой СУБД
Bednyak S., Shishkin A. — Security at the transaction isolation level: between DBMS theory and practice.....42

Васильева Т.Ю. — CALS–технологии — основа модернизации современных наукоемких производств
Vasilyeva T. — CALS–technologies are the basis for modernizing modern science-intensive production.....47

Ганьшин А.С., Андриков Д.А. — Применение H-бесконечного регулятора для стабилизации концентрации глюкозы в контуре биоискусственной печени

Ganshin A., Andrikov D. — The use of an H-infinite regulator to stabilize glucose concentration in the contour of a bio-artificial liver 50

Жангериев А.Ю., Шапсигов А.Х., Жангериев С.А. — Использование методов машинной кластеризации для поиска и прогнозирования свойств новых лекарственных препаратов (на примере нестероидных противовоспалительных средств)
Zhangeriev A., Shapsigov A., Zhangeriev S. — Use of machine clustering methods for search and forecasting of new non-steroid anti-inflammatory agents 54

Жолондиевский Э.Р. — Элементы математической модели нейроморфных стимульно-реактивных BEAM-роботов
Zholondiyevsky E. — Elements of a mathematical model for neuromorphic stimulus-reactive BEAM robots. 61

Закарюкин М.А. — Оценка эффективности внедрения нейросетевого модуля в экспертную систему управления ЗПИФ
Zakaryukin M. — Evaluating the effectiveness of implementing a neural network module in an expert management system for a closed-end mutual fund 66

Закирова А.Р. — Галлюцинации генеративных моделей ИИ в автоматизированной финансовой аналитике: выявление, оценка и предотвращение
Zakirova A. — Hallucinations of generative ai models in automated financial analytics: identification, assessment and prevention 71

Кривов А.В., Мартыненко А.А., Суворов С.В. — Пространственно-временное моделирование транспортно-обусловленной эмиссионной нагрузки мегаполиса на основе методов машинного обучения (на примере города Москвы)
Krivov A., Martynenko A., Suvorov S. — Spatiotemporal modeling of transport-induced emission load in a metropolis based on machine learning methods (case study of Moscow). 76

Кузнецов А.С., Чеканов И.Р., Пивнева С.В., Колыбанов К.Ю. — Информационное моделирование процесса актуализации нормативно-правового обеспечения в предметной области информационной безопасности
Kuznetsov A., Chekanov I., Pivneva S., Kolybanov K. — Information modeling of the process of updating regulatory and legal support in the subject area of information security 82

Малахов С.В., Коняшкин Н.А., Тишков И.И., Амиров Р.Р., Зубарев И.А. — ManyNets в концепции Network 2030 (ITU-T FG Net-2030): метрики гетерогенности и индекс сложности конвергенции доменов
Malakhov S., Konyashkin N., Tishkov I., Amirov R., Zubarev I. — ManyNets in the network 2030 concept (ITU-T FG Net-2030): heterogeneity metrics and domain convergence complexity index 88

Приходько Д.С., Приходько А.П. — Методика оценки качества журналируемых данных в высоконагруженных распределённых системах
Prikhodko D., Prikhodko A. — Methodology for assessing the quality of log data in high-load distributed e-commerce systems. 93

Стручкова А.М. — Автоматизация технологической подготовки производства ремонта авиационной техники на основе интеграции САПР и гибридных экспертных систем
Struchkova A. — Automation of technological preparation of production of repair of aircraft equipment based on the integration of cad and hybrid expert systems 96

Тшипунгу Эдуарду Афонсу — Разработка системы автоматизированного управления станцией очистки шахтных вод на основе Fuzzy-PID контроля параметров TDS, pH и уровня
Tchipungo Eduard Afonso — Development of an automated control system for a mine water treatment plant based on Fuzzy-pid control of TDS, pH and level parameters. 101

Тшипунгу Эдуарду Афонсу — Моделирование и анализ системы частотно-регулируемого электропривода насосного агрегата с ПИД-регулятором для условий хвостохранилища
Tchipungo Eduardo Afonso — Modeling and analysis of a variable frequency drive system for a pump unit with a PID controller for tailings storage conditions. 109

Клиническая медицина

Бахтарова Х.Х.-П., Дадаев А.Я., Берсанов Р.У., Мадаева М.С., Дадаева Э.А. — Муцинозная аденокарцинома сигмовидной кишки с BRAF V600E мутацией у пациента молодого возраста: диагностическая значимость УЗИ и осложненное послеоперационное течение
Bakhtarova Kh., Dadayev A., Bersanov R., Madaeva M., Dadaeva E. — Mucinous adenocarcinoma of the sigmoid colon with BRAF V600E mutation in a young patient: diagnostic significance of ultrasound and complicated postoperative course 116

Ветшев Ф.П., Егоров А.В., Жемерикин Г.А., Русскова К.С., Ян Ихань — Сравнительный анализ чрескожных методов хирургического лечения непаразитарных кист печени
Vetshev F., Egorov A., Zhemerikin G., Russkova K., Yihan Yang — Comparison analisys of percutaneous techniques for non-parasitic liver cysts 121

Гулей Ю.В., Сидорова Ю.Д., Давидян Л.Ю. — Факторы, влияющие на прогрессирование миомы матки у женщин репродуктивного возраста
Guley Yu., Sidorova Yu., Davidyan L. — Factors influencing the progression of uterine fibroids in women of reproductive age 125

Далгатова А.А., Федорова Н.Я., Федорова Ф.А., Меживгаджиева А.Р. — Адаптивный иммунитет и уровень кортизола при I степени тяжести синдрома длительного сдавления в раннем посткомпрессионном периоде
Dalgatova A., Fedorova N., Fedorova F., Mezhivgadzhieva A. — Adaptive immunity and cortisol levels in patients with grade I syndrome of prolonged compression in the early post-compression period 131

Джанбулатов М.А., Будайчиев Г.М.-А., Чавтараев М.М., Магомедова У.А., Курбанова Э.А. — Прогностическая ценность сочетания клинических тестов и пульсоксиметрии зуба при диагностике обратимого и необратимого пульпита
Dzanbulatov M., Budaichiev G., Chavtaraev M., Magomedova U., Kurbanova E. — Prognostic value of combining clinical tests and tooth pulse oximetry in the diagnosis of reversible and irreversible pulpitis..... 137

Елисеев С.В. — Морфометрический анализ межмыщелкового расстояния по данным конусно-лучевой компьютерной томографии и его сопоставление со стандартизированным параметром артикуляторов
Eliseev S. — Morphometric analysis of intercondylar distance based on cone-beam computed tomography and its comparison with the standardized articulator parameter..... 143

Кокшарова Т.С., Холявин А.И., Самсонов Д.В., Кальменс В.Я. — Микроэлектродный рекординг при стереотаксической DBS-хирургии
Koksharova T., Kholyavin A., Samsonov D., Kal'mens V. — Microelectrode recording in stereotactic DBS surgery..... 147

Мамонтова Л.Н., Коротких И.Н. — Результаты применения комбинации миоинозитола, D-хироинозитола в соотношении 5:1 и пиколината хрома у женщин с синдромом поликистозных яичников
Mamontova L., Korotkikh I. — Results of the use of a combination of myo-inositol and D-chiro-inositol in a 5:1 ratio with chromium picolinate in women with polycystic ovary syndrome..... 152

Сизов А.В. — Сравнение эффективности различных методов скрининга гестационного сахарного диабета
Sizov A. — Comparison of the effectiveness of various screening methods for gestational diabetes mellitus 158

Сизов А.В. — Генетические маркеры предрасположенности к гестационному сахарному диабету
Sizov A. — Genetic markers of predisposition to gestational diabetes mellitus 162

Тырышкин С.Ю. — Патогенетические механизмы развития ишемического инсульта и подходы к первичной и вторичной профилактике
Tyryshkin S. — Pathogenetic mechanisms of ischemic stroke and approaches to primary and secondary prevention 166

Наши авторы 171

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.05

ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ РЕГРЕССИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ БИОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФОЛИОПРОБ ДЕНДРОФЛОРЫ И ИЗА В Г.БРЯНСК

POLYNOMIAL REGRESSION DEPENDENCE OF BIOCHEMICAL INDICATORS OF FOLIO SAMPLE OF DENDROFLORA AND AQI IN BRYANSK

E. Borzdyko
M. Dolganova
M. Avramenko
V. Demikhov
O. Chigray

Summary. It was revealed that in 2025, in 4 districts of Bryansk, a positive correlation was found between the content of catechins, sucrose in foliar samples and their diagnostic biochemical indicators of resistance ($DBPU1_{catechin}$ and $DBPU2_{sucrose}$) of dendroflora and the Air Quality Index (AQI) (r=+0.995852 and r=+0.983371). Polynomial regression equations were compiled — for DBPU1 (catechin): $y = 24.814x^2 - 48.19x + 25.931$, for DBPU2 (sucrose): $y = 46.635x^2 - 109.48x + 67.33$, indicating a reliable relationship between biochemical indicators and the Air Quality index: with an increase in the AQI in the urban ecosystem, the content of catechins, sucrose and their DBPU in folio samples of dendroflora increases. A statistically significant excess of catechins and sucrose content was revealed in urbanized environments compared to the control (pgt. Rognedino). The obtained data confirm the diagnostic significance of the studied indicators in biomonitoring of atmospheric air pollution.

Keywords: Air Quality index, biomonitoring, urban ecosystem, regression analysis, diagnostic biochemical parameter of stability, dendroflora.

Борздыко Елена Васильевна
Кандидат биологических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»
elena.borzdyko@inbox.ru
Долганова Марина Владимировна
Кандидат биологических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»
dolganova0801@yandex.ru
Авраменко Марина Васильевна
Кандидат биологических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»
avramenko_marina84@mail.ru
Демихов Владимир Тихонович
Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»
fir-sasha@yandex.ru
Чиграй Ольга Николаевна
Кандидат биологических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»
chigrai-olga@mail.ru

Аннотация. Выявлено, что в 2025 году в 4-х районах г. Брянска между содержанием катехинов, сахарозы в фолиопробах и их диагностическими биохимическими показателями устойчивости ($ДБПУ1_{катехин}$ и $ДБПУ2_{сахароза}$) дендрофлоры и индексом загрязнения атмосферы (ИЗА) выявлена положительная корреляционная связь (r=+0,995852 и r=+0,983371). Составлены полиномиальные уравнения регрессии — по ДБПУ1 (катехин): $y=24,814x^2-48,19x+25,931$, по ДБПУ2 (сахароза): $y=46,635x^2-109,48x+67,33$, указывающие на достоверную взаимосвязь между биохимическими показателями и индексом загрязнения атмосферы: с увеличением ИЗА в урбоэкосистеме, увеличивается содержание катехинов, сахарозы и их ДБПУ в фолиопробах дендрофлоры. Выявлено статистически достоверное превышение содержания катехинов и сахарозы в условиях урбанизированной среды по сравнению с контролем (пгт. Рогнедино). Полученные данные подтверждают диагностическую значимость исследуемых показателей в биомониторинге загрязнения атмосферного воздуха.

Ключевые слова: индекс загрязнения атмосферы, биомониторинг, урбоэкосистема, регрессионный анализ, диагностический биохимический параметр устойчивости, дендрофлора.

В условиях урбанизированных территорий возрастает антропогенная нагрузка на атмосферный воздух, что оказывает комплексное стрессовое воздействие на древесную растительность. Биохимические показатели фитомассы растений — это чувствительные маркеры экологического состояния среды. Катехины и сахароза выполняют защитные и адаптационные функции, участвуя в антиоксидантных реакциях и регуляции осмотического потенциала клеток. Выявление количественной зависимости между индексом загрязнения атмосферы (ИЗА) и биохимическими показателями позволяет расширить инструментарий экологической диагностики урбоэкосистем [2,4].

Традиционные методы инструментального контроля качества атмосферного воздуха, основанные на прямых измерениях концентраций веществ (например, расчет ИЗА), предоставляют важную информацию о физико-химическом составе воздушной среды. Однако они не всегда позволяют в полной мере оценить интегральный биологический отклик живых организмов на комплексное воздействие загрязнений. В этом контексте биоиндикационные методы приобретают особую значимость: позволяют выявить скрытые, доклинические изменения в экосистемах [4].

Комплексный экоконтроль (биоиндикационный и инструментальный) позволяет выявлять регрессионные зависимости между биохимическими показателями дендрофлоры и ИЗА городской среды [3].

Цель — выявить регрессионную зависимость между биохимическими показателями фолиопроб дендрофлоры и индексом загрязнения атмосферного воздуха г. Брянска.

В 2025 г. выбраны объектами исследования 4 древесных растений (ель европейская, клен остролистный, липа сердцелистная, рябина обыкновенная), распространенные и произрастающие в 4-х районах г. Брянска (Бежицкий, Советский, Володарский, Фокинский) с разными показателями ИЗА. Всего было заложено 16 точек в урбоэкосистеме Брянск и одна в пгт. Рогнедино (контрольная точка для сравнения) [5].

В работе применялись методы: 1. инструментальный мониторинг атмосферного воздуха [4], 2. Биоиндикационный (определение содержания катехинов, сахарозы в мг% на сухое вещество) [1,2], 3. статистический [3].

В таблице 1 (2025 г.) приведены результаты исследований ИЗА, содержания катехинов, сахарозы в фолиопробах дендрофлоры и их диагностическими биохимическими показателями устойчивости (ДБПУ) в 4-х районах г. Брянска.

Анализируя данные исследований, можно отметить, что содержание катехинов, сахарозы в фитомассе дендрофлоры во всех 4-х районах города существенно выше контроля в 1,15–1,31 и 1,27–1,43 раза ($t_{факт}>t_{табл}$, P=99 %) соответственно.

В Советском районе отмечена максимальная концентрация катехинов (2,6025 мг%/на сух. в-во) и сахарозы (7,7050 мг%/на сух. в-во), минимальная Володарском (2,2850 мг%/на сух. в-во и 6,8475 мг%/на сух. в-во соответственно). Видимо, повышение содержания катехинов и сахарозы в клетках растений усиливает адаптацию растений к стрессам. Для Советского района характерен максимальный ДБПУ1 по катехину — 1,2925 и ДБПУ2 по сахарозе — 1,3825, наименьший для Володарского и ДБПУ1 по катехину составляет 1,13, а ДБПУ2 по сахарозе — 1,2175. Такой разброс в биохимических показателях можно объяснить разной интенсивностью загрязнения атмосферного воздуха от различных источников подвижного состава, наличием различия в количестве стационарных источников загрязнения атмосферного воздуха, рельефом местности (овражно-балочная система), наличием защитных зеленых полос, видовыми особенностями древесных растений. Составлен ряд по степени уменьшения содержания катехинов и сахарозы в дендрофлоре для 4-х районов г. Брянска: Советский > Бежицкий > Фокинский > Володарский.

Инструментальные исследования в 2025 г. показали, что в г. Брянск индекс загрязнения атмосферного воздуха колебался в пределах 3,16…5,1. Среднее значение ИЗА составило 4,05, что характеризует показатель как низкий. По степени убывания загрязнения атмосферного воздуха районы города расположились в следующем порядке: Советский > Бежицкий > Фокинский > Володарский.

Полиномиальная регрессионная зависимость диагностического биохимического показателя устойчивости растений (ДБПУ1 по катехину) и ИЗА в 4-х р-нах г. Брянска отмечена на рисунке 1.

Между двумя этими параметрами выявлена положительная корреляционная связь (r=+0,995852).

Составлено уравнение регрессии: $y=24{,}814x^2-48{,}19x+25{,}931$. Положительный коэффициент аппроксимации ($R^2=1$) свидетельствует о достоверности, выявленной зависимости.

На рисунке 2 приведена полиномиальная регрессионная зависимость диагностического биохимического показателя устойчивости растений (ДБПУ2 по сахарозе) и ИЗА в 4-х р-нах г. Брянска.

В ходе обработки результатов исследования выявлена положительная корреляционная связь (r=+0,983371)

Таблица 1.

ИЗА, содержание катехинов, сахарозы и их ДБПУ в фитомассе дендрофлоры в 4-х районах г. Брянска 2025 г.

№ п/п	вид	Среднее значение содержания катехинов (мг% /сух.в-во)		ДБПУ1 (катехинов)	Среднее значение содержания сахарозы (мг% /сух.в-во)		ДБПУ2 (сахарозы)
		Контроль (пгт. Рогнедино) ИЗА=2,2	опыт		Контроль (пгт. Рогнедино) ИЗА=2,2	опыт	
Советский р-н, ИЗА=5,1							
1	ель колючая	2,79±0,02	3,86±0,02	1,38	8,5±0,02	13,47±0,02	1,59
2	клен остролистный	2,08±0,02	2,73±0,02	1,31	5,9±0,02	8,11±0,02	1,38
3	липа сердцелистная	1,8±0,01	2,32±0,01	1,29	4,5±0,01	5,81±0,02	1,29
4	рябина обыкновенная	1,26±0,01	1,50±0,01	1,19	2,7±0,01	3,43±0,01	1,27
Бежицкий р-н, ИЗА=4,36							
1	ель колючая	2,79±0,02	3,63±0,02	1,30	8,5±0,02	12,86±0,02	1,51
2	клен остролистный	2,08±0,02	2,66±0,02	1,28	5,9±0,02	7,93±0,02	1,35
3	липа сердцелистная	1,8±0,01	2,19±0,01	1,22	4,5±0,01	5,67±0,02	1,26
4	рябина обыкновенная	1,26±0,01	1,47±0,01	1,17	2,7±0,01	3,35±0,01	1,24
Фокинский р-н, **ИЗА=3,57**							
1	ель колючая	2,79±0,02	3,54±0,02	1,27	8,5±0,02	12,40±0,02	1,46
2	клен остролистный	2,08±0,02	2,48±0,02	1,19	5,9±0,02	7,32±0,02	1,24
3	липа сердцелистная	1,8±0,01	2,05±0,01	1,14	4,5±0,01	5,49±0,02	1,22
4	рябина обыкновенная	1,26±0,01	1,39±0,01	1,10	2,7±0,01	3,21±0,01	1,19
Володарский р-н, ИЗА=3,16							
1	ель колючая	2,79±0,02	3,46±0,02	1,24	8,5±0,02	12,17±0,02	1,43
2	клен остролистный	2,08±0,02	2,41±0,02	1,16	5,9±0,02	7,08±0,02	1,20
3	липа сердцелистная	1,8±0,01	1,98±0,01	1,10	4,5±0,01	5,22±0,02	1,16
4	рябина обыкновенная	1,26±0,01	1,29±0,01	1,02	2,7±0,01	2,92±0,01	1,08

между ДБПУ2 дендрофлоры (по сахарозе) и ИЗА в урбоэкосистеме.

Уравнение регрессии: $y=46{,}635x^2-109{,}48x+67{,}33$ и положительный коэффициент аппроксимации ($R^2=1$) свидетельствует о достоверности, выявленной зависимости.

Высокие значения коэффициентов корреляции и детерминации свидетельствуют о достоверности выявленных закономерностей и возможности использования данных показателей в качестве ранних биоиндикаторов загрязнения атмосферы.

Интерпретация научных исследований указывает на то, что рост концентрации катехинов при увеличении ИЗА отражает усиление антиоксидантной защиты растений в ответ на оксидативный стресс. Повышение уровня сахарозы связано с регуляцией осмотического баланса и энергетическим обеспечением стресс-ответа.

Таким образом, чем выше уровень загрязнения атмосферного воздуха, тем интенсивнее проявляются адаптивные реакции растений, выражающиеся в увеличении синтеза и накоплении катехинов и сахарозы. Можно предположить, что увеличение содержания катехинов и сахарозы в фитомассе дендрофлоры и их диагностических биохимических показателей устойчивости по мере усиления ИЗА — отличный биологический параметр раннего оповещения изменений такого условия окружающей среды как загрязнение атмосферного воздуха любой урбоэкосистемы.

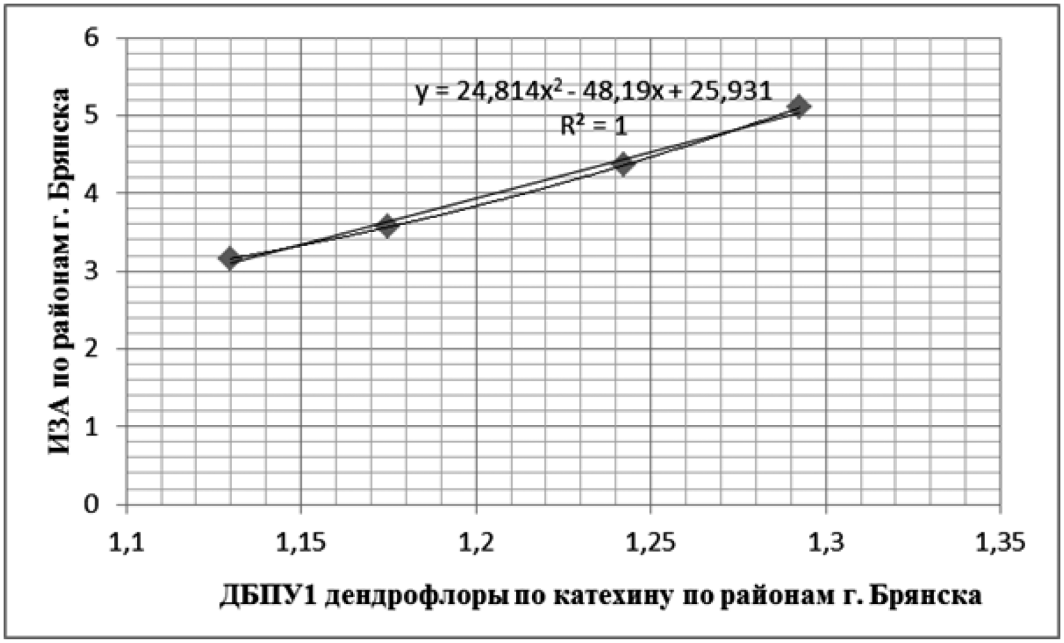


Рис. 1. Полиномиальная регрессионная зависимость ДБПУ1 дендрофлоры (по катехину) и ИЗА в г. Брянск

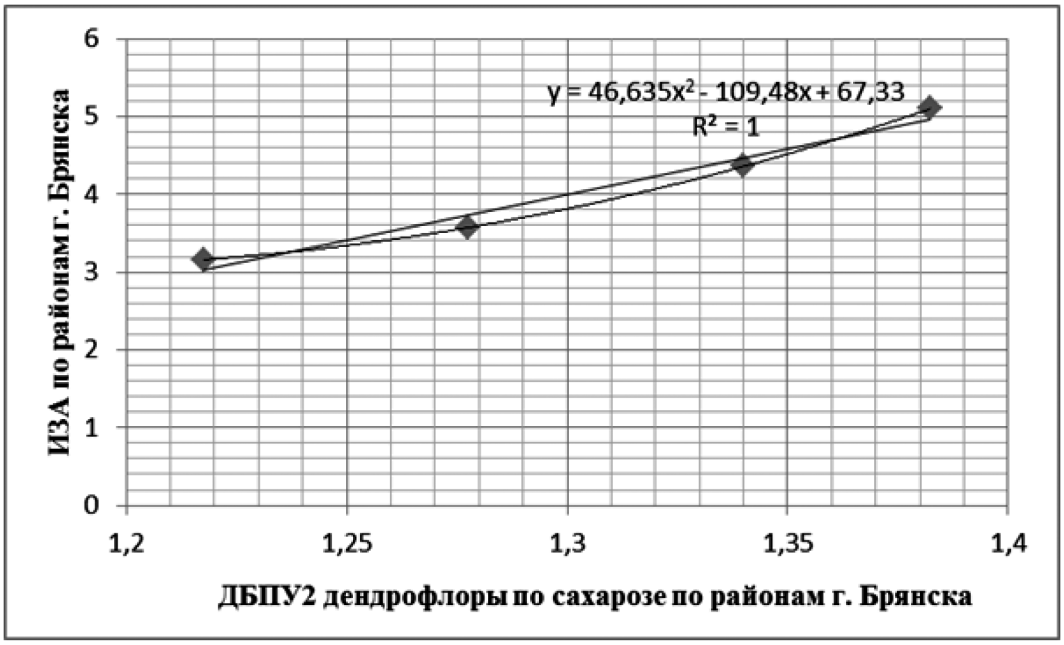


Рис. 2. Полиномиальная регрессионная зависимость ДБПУ2 дендрофлоры (по сахарозе) и ИЗА в г. Брянск

В целом можно сформулировать следующие выводы:

1. Установлено статистически достоверное увеличение содержания катехинов и сахарозы в условиях урбанизированной среды по сравнению с контролем (пгт. Рогнедино).
2. Между ИЗА и содержанием катехинов выявлена высокая положительная корреляционная связь (r=+0,97).
3. Между ИЗА и содержанием сахарозы выявлена высокая положительная корреляционная связь (r=+0,95).
4. Полученные полиномиальные регрессионные уравнения адекватно описывают зависимость биохимических показателей от уровня загрязнения атмосферы (R^2>0,9).
5. Катехины и сахароза могут рассматриваться как чувствительные диагностические параметры устойчивости дендрофлоры к антропогенному загрязнению.
6. Биохимический мониторинг фолиопроб — это перспективный инструмент экологической оценки состояния урбоэкосистем.

Однако следует добавить, что для подтверждения найденных закономерностей следует продолжить данные исследования для подтверждения многолетней динамики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биоорганическая химия: учебник для вузов/по ред. Н.А. Тюкавкина, Ю.И. Баукова.-6-е изд.— М.: Дрофа, 2007.— С.314-357.
2. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений. М.: Высшая школа, 2005. 742 с.
3. Никифоренко Ю.Ю. Статистические методы в экологии и природопользовании: учебное пособие. — Краснодар: КубГАУ, 2019.— 88 с.
4. Опекунова М.Г. Биоиндикация загрязнений: учебное пособие. — СПб.: Из-во С.-Петербургского университета, 2016.— 300с.
5. Природные ресурсы и окружающая среда Брянской области. Годовой доклад об экологической ситуации в Брянской области в 2023 г. /Департамент природных ресурсов и экологии Брянской области — Брянск: ООО «Издательство Читай-город», 2024. — 212 с.

© Борздыко Елена Васильевна (elena.borzdyko@inbox.ru); Долганова Марина Владимировна (dolganova0801@yandex.ru);
Авраменко Марина Васильевна (avramenko_marina84@mail.ru); Демихов Владимир Тихонович (fir-sasha@yandex.ru);
Чиграй Ольга Николаевна (chigrai-olga@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.17

К ОЦЕНКЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ИНТРОДУЦИРОВАННЫХ И АБОРИГЕННЫХ ВИДОВ ПО БИОХИМИЧЕСКИМ ПРИЗНАКАМ В УСЛОВИЯХ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ

TO THE ASSESSMENT OF ECOLOGICAL STABILITY OF INTRODUCED AND NATIVE SPECIES BASED ON BIOCHEMICAL CHARACTERISTICS IN THE BRYANSK REGION

L. Zemskova
V. Nesterenko
M. Avramenko
E. Anishchenko
L. Anishchenko

Summary. For urbanized areas, biochemical monitoring was conducted to study the content of eco-monitoring substances in plant biomass, and plant resistance coefficients to changes in the air environment were calculated in administrative districts with combined pollution in the Bryansk region. The objective of this study is to present data on the resistance of native and introduced plant species based on resistance coefficients in the Non-Black Earth Region of the Russian Federation as a baseline for organizing biomonitoring. Biochemical and statistical methods were used. It was established that anthropogenic pollution has a significant impact on changes in the content of total nitrogen, glutathione, and vitamin E—bioactive protective substances—which increases the resistance of trees and shrubs to stress. A series of woody plant sensitivity to air pollution was compiled: by the degree of total nitrogen reduction — *Picea abies* > *Thuja occidentalis* > *Syringa vulgaris* > *Acer platanoides* > *Tilia cordata* > *Sorbus aucuparia*; by the degree of glutathione content reduction — *Picea abies* > *Thuja occidentalis* > *Syringa vulgaris* > *Acer platanoides* > *Tilia cordata* > *Sorbus aucuparia*; by the degree of vitamin E content reduction — *Picea abies* > *Thuja occidentalis* > *Sorbus aucuparia* > *Tilia cordata* > *Syringa vulgaris* > *Acer platanoides*. A strong direct regression relationship was established between the air pollution index and the average resistance coefficient for total nitrogen, vitamin E, and glutathione in the biomass of model woody plants: with increasing air pollution, the average resistance coefficient for certain biochemical parameters increases.

Keywords: biochemical parameters, woody species, biologically active substances, stress resistance, resistance coefficients, Non-Black Earth Region of the Russian Federation, Bryansk Oblast.

Земскова Лолита Алексеевна
Аспирант, ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»
eco_egf@mail.ru
Нестеренко Виктория Михайловна
Аспирант, ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»
vivo.mih@gmail.com
Авраменко Марина Васильевна
Кандидат биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»
avramenko_marina84@mail.ru
Анищенко Елизавета Игоревна
ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»
liza_anisch@mail.ru
Анищенко Лидия Николаевна
Доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»
Lanishchenko@mail.ru

Аннотация. Для урбанизированных районов в рамках биохимического мониторинга проведены исследования содержания экомониторинговых веществ в биомассе растений и вычислены коэффициенты устойчивости растений к изменению воздушной среды в административных районах с сочетанным загрязнением в условиях Брянской области. Цель работы — представить данные по устойчивости аборигенных и интродуцированных видов зелёных насаждений на основе коэффициентов устойчивости в Нечерноземье РФ как базовые данные для организации биомониторинга. Установлено, что антропогенное загрязнение оказывает существенное влияние на изменение содержание общего азота, глутатиона и витамина Е — биологически активных протекторных веществ, что увеличивает сопротивляемость древесных и кустарниковых растений к стрессу. Составлен ряд чувствительности древесных растений к аэрозагрязнению: по степени уменьшения общего азота — *Picea abies* > *Thuja occidentalis* > *Syringa vulgaris* > *Acer platanoides* > *Tilia cordata* > *Sorbus aucuparia*; степени уменьшения содержания глутатиона — *Picea abies* > *Thuja occidentalis* > *Syringa vulgaris* > *Acer platanoides* > *Tilia cordata* > *Sorbus aucuparia*; степени уменьшения содержания витамина Е — *Picea abies* > *Thuja occidentalis* > *Sorbus aucuparia* > *Tilia cordata* > *Syringa vulgaris* > *Acer platanoides.* Определена тесная прямая регрессионная зависимость индекса загрязнения атмосферы и среднего коэффициента устойчивости по содержанию общего азота, витамина Е и глутатиона в биомассе модельных древесных растений: с увеличением степени загрязнения воздуха растет средний коэффициент устойчивости по определённым биохимическим показателям.

Ключевые слова: биохимические показатели, древесные виды, биологически активные вещества, устойчивость к стрессу, коэффициенты устойчивости, Нечерноземье РФ, Брянская область.

Введение

Обеспечение внедрения ранней диагностики состояния среды — одно из приоритетных направлений в реализации экологических программ в биосфере для целей обеспечения экобезопасности населения. Многие авторы считают, что среди биологических показателей один из самых чувствительных — биохимические, при которых преобразования наблюдаются первыми в клетках, причем морфологические, физиологические и иные отклонений от нормы при этом ещё не фиксируются [1]. Растительные объекты и их биохимические показатели, по мнению многих авторов, оптимальная биоиндикационная тест-система, реагирующая адекватно и быстро на загрязнения среды антропогенной этиологии [2–3]. Биохимия представителей дендрофлоры удобна в исследованиях, так как эти многолетние стационарные объекты способны длительно депонировать токсичные загрязнения. Протекторные свойства дендрофлоры — активация биохимической многофункциональной антиоксидантной защиты в виде аминокислот, их ферментов, увеличение содержания водорастворимых и жирорастворимых витаминов, макроэлементов, динамика сахаров [3–5]. Зарубежные авторы, объединив биохимические и морфолого-анатомические, физиологические показатели деревьев, кустарников, реже — травянистых растений, анализируют индекс толерантности к загрязнению воздуха для сравнительной характеристики видов, косвенной оценки состояния воздуха, сравнительных диагностических мероприятий [6–11]. Air pollution tolerance index — APTI — рассчитывался с учётом спектра физиологических и биохимических качеств в биомассе побегов, корней; концентрация пыли также оценивалась через индекс толерантности [10–12]. На основе APTI (чем выше показатели индекса, тем устойчивее вид) выявляли спектр устойчивых к экофакторам видов, затем предлагали ассортимент зелёных насаждений для экологического каркаса городов или реабилитации сред обитания, организации экомониторинга — по чувствительным видам с низкими значениями APTI [13]. Таким образом, различная толерантность (устойчивость, выносливость) древесных и кустарниковых растений к общему загрязнению воздуха в урбанизированных ландшафтах позволяет не только эффективно проводить биоиндикацию, но и использовать эко-физиологические реакции особей видов в конструировании защитных зелёных насаждений, которые определяют поглотительную способность городских лесов и здоровье горожан [6–12].

Ввиду организации масштабных изысканий в рамках всероссийской программы «Экополис» по оценке состояния сед обитания в урбанизированных районах, в том числе оценке адаптации растений в агроценозах отечественными исследователями анализируются данные биохимического состава растительной биомассы. Российскими авторами предложены модификации APTI: индекс адаптации растений к тяжёлым металлам [14]. Для крупного города Нечерноземья РФ за период с 2017 по 2023 гг. выявлена динамика накопления зелёной биомассой пролина в условиях городского стресса для 14 видов покрытосеменных и голосеменных растений; установлены границы изменений рассчитанного коэффициента кумуляции (интерпретируемого как коэффициент устойчивости (КУ), аналога APTI): от 3,5 до 6,8 (мг % на сырую массу) [15].

Возникла целесообразность увеличения охвата исследованиями урбанизированных территорий Брянской области, расширения спектра определения биохимических показателей биомассы интродуцированных и аборигенных видов как «маркеров» состояния урбанизированной среды. Для выявления и анализа адаптивных признаков древесных и кустарниковых видов к воздействию стресс-факторов поставлена цель настоящей работы — представить данные по устойчивости аборигенных и интродуцированных видов зелёных насаждений на основе коэффициентов устойчивости в Нечерноземье РФ как базовые данные для организации биомониторинга.

Материалы, методы, методики исследования

Впервые биохимические данные для последующего анализа состояния воздуха были получены для Дятьковского района Брянской области как территории с сочетанным химическим и радионуклидным загрязнением для прогнозирования экологической ситуации. На протяжении более 30-летнего периода территория характеризуется значительной антропогенной нагрузкой и самыми высокими показателями загрязнения [13]. Биохимические показатели — содержание азота, глутатиона, витамина Е — определены в надземной биомассе 6 фоновых видов древесных растений — интродуцентов и аборигенных видов — в 180 пробах: *Acer platanoides* L. (AP), *Tilia cordata* Mill. (TC); *Picea abies* (L.) Karst. (PA), *Thuja occidentalis* L. (TO), *Sorbus aucuparia* L. (SA), *Syringa vulgaris* L. (SV). Концентрации биологически активных веществ в биомассе видов использовались для расчёта и анализа эколого-биологического коэффициента устойчивости. В работе использованы следующие методы: натурные и камеральные, лабораторно-химические: содержание общего азота, глутатиона, витамина Е [16]. Глутатион определялся титриметрически — метод йодометрии; общий азот, витамин Е — спектрофотометрически. Пробы отбирались на территории 11 населённых пунктов, в том числе и пгт. Суземка (фоновые сборы) [17]. Все пробы изымались для анализа в камеральных условиях с соблюдением единых требований и методик проботбора [18–19]. Рассчитывали коэффициент устойчивости как отношение содержания азота общего, витамина Е и глутатиона в биомассе растений исследуемых местообита-

ний к содержанию этих биологически активных веществ в биомассе видов фоновых местообитаний.

Инструментальные исследования показали, что в 2023–2025 гг. наибольшее изменение атмосферного воздуха выявлено в населенных пунктах: г. Дятьково, д. Березино, пгт. Любохна, пгт. Старь и пгт. Ивот. Индекс загрязнения воздуха (ИЗА) колебался в пределах 7,646–5,01 (повышенный), среднее значение ИЗА — 5,29 (рисунок 1).

Зафиксированы превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) у: оксида азота (II) в 1,070–2,421 раза (диоксида азота — в 1,020–1,304, формальдегида — в 1,101–2,283, диоксида серы — в 1,050–3,480, сероводорода — в 1,372–1,024, оксида углерода — в 1,080–2,902, аммиака — в 1,153–1,750 раза. Результаты пробоотбора в населенных пунктах Дятьковского района показали превышение контроля (пгт. Суземка): по оксиду азота (II) в 0,384–24,180 раза, диоксиду азота — в 1,200–1,550, диоксиду серы в 1,854–4,010, оксиду углерода — 1,472–4,850, аммиаку в 1,801–3,890 раза. В контроле формальдегид и сероводород не зафиксирован, поэтому сравнение этих веществ не велось.

Результаты исследований и их обсуждение

По результатам лабораторно-химических исследований составлен ряд чувствительности древесных растений к аэрозагрязнению по степени уменьшения содержания общего азота в биомассе (на примере г. Дятьково): *Picea abies* > *Thuja occidentalis* > *Syringa vulgaris* > *Acer platanoides* > *Tilia cordata* > *Sorbus aucuparia*. Аналогичные тенденции отмечены для растений из других населенных пунктов Дятьковского района.

Важно отметить, что в условиях относительно чистых (контроль) сложно отследить чувствительность растений к аэрозагрязнениям из-за низкой концентрации или их отсутствия.

Полученный спектр фиторяда показал, что наиболее чувствительны к аэрозагрязнению виды хвойных растений по сравнению с лиственными. На рисунках 2–3 показаны средние коэффициенты устойчивости (КУ) (по содержанию общего азота, глутатиона, витамина Е) дендрофлоры.

При анализе КУ составлен ряд по степени уменьшения средних значений по содержанию общего азота в древесных растениях: г. Дятьково > д. Березино > пгт. Любохна > пгт. Старь> пгт. Ивот > п. Дружба > д. Верхи > с. Немеричи > с. Слободище. Содержание общего азота в листьях некоторых древесных растений в 6-и населённых пунктов (нп) района (г. Дятьково, д. Березино, пгт. Любохна, пгт. Старь, пгт. Ивот) достоверно выше контроля в 1,32–1,21 раза ($t_{факт}$>$t_{табл}$, P=99,0 %). В остальных четырёх населён-

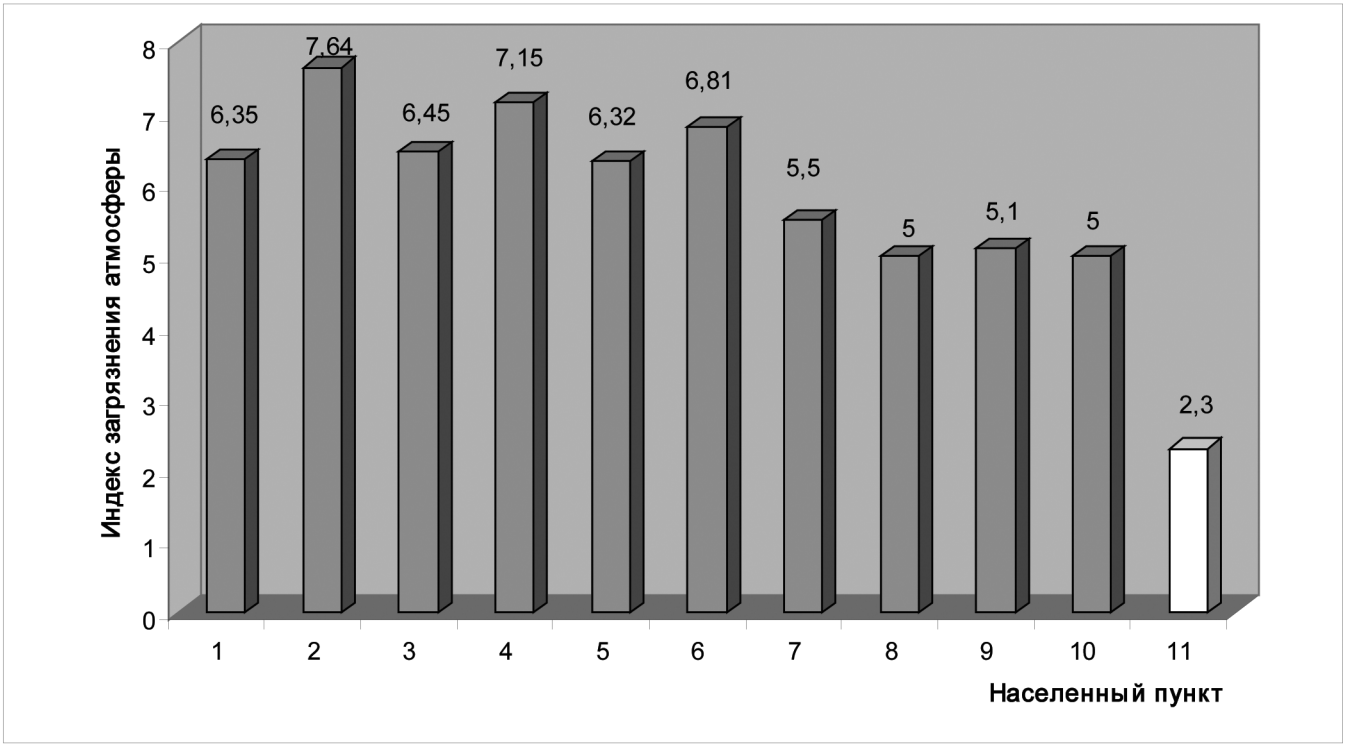
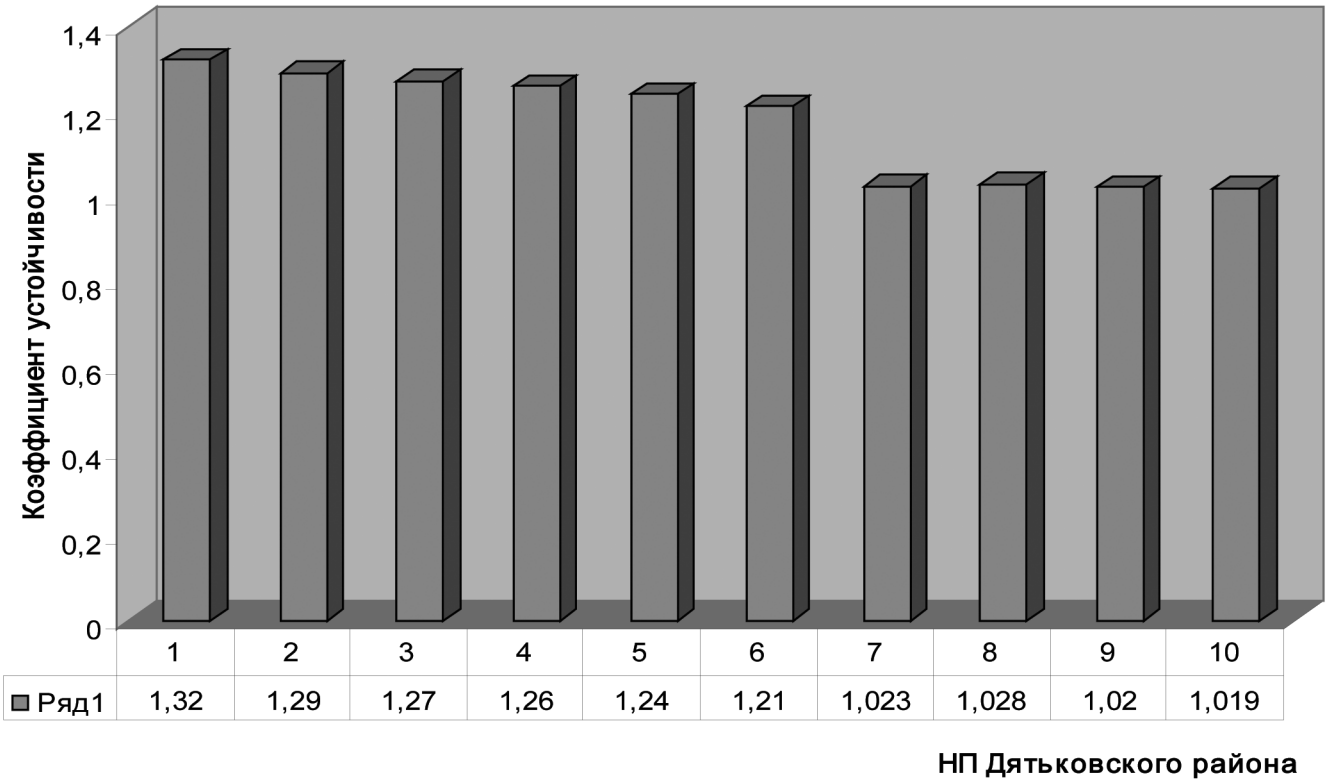
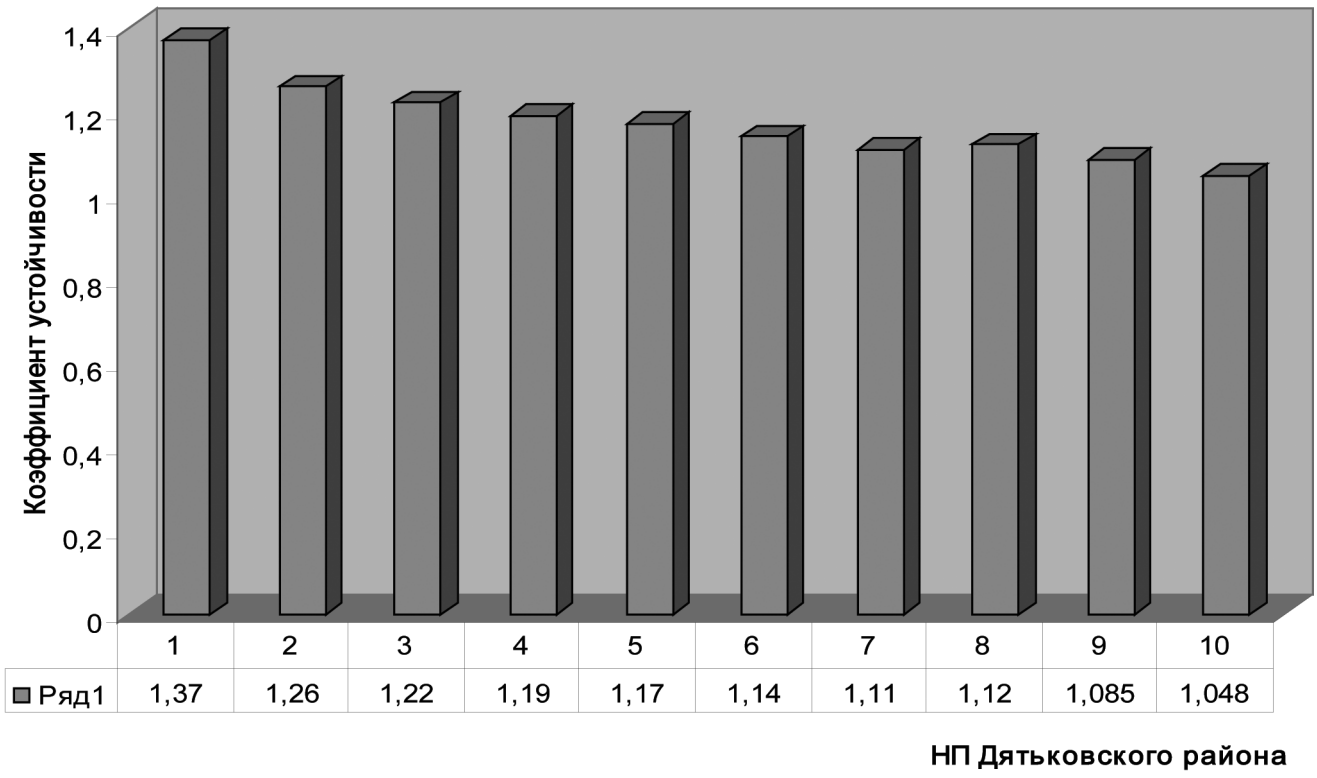


Рис. 1. Индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) в условиях Дятьковского района (в 2023–2025 гг.)
Примечание: Населённые пункты (НП). 1 — пгт. Бытошь, 2 — г. Дятьково, 3 — пгт. Ивот, 4 — пгт. Любохна, 5 — пгт. Старь, 6 — д. Березино, 7 — п. Дружба, 8 — д. Верхи, 9 — с. Немеричи, 10 — с. Слободище, 11 — Контроль (пгт. Суземка, Суземский район)



А



Б

Рис. 2. Средний коэффициенты устойчивости (А — по содержанию общего азота; Б — по содержанию глутатиона, мг% на сырую массу) биомассы растений в условиях Дятьковского района

Примечание: Населённые пункты. 1 — г. Дятьково, 2 — д. Березино, 3 — пгт. Любохна, 4 — пгт. Бытошь, 5 — пгт. Старь, 6 — пгт. Ивот, 7 — с. Немеричи, 8 — п. Дружба, 9 — д. Верхи, 10— с. Слободище

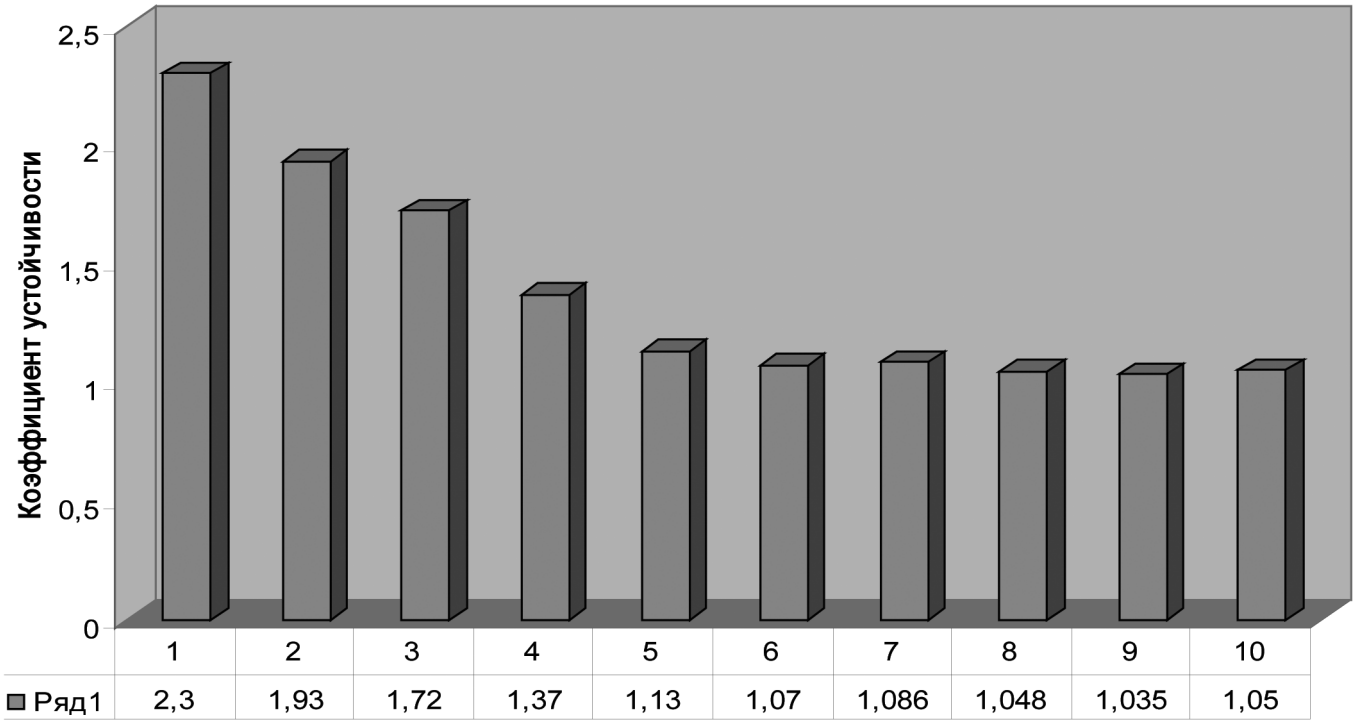


Рис. 3. Средние значения коэффициента устойчивости по содержанию витамина Е (мг% на сырую массу) биомассы растений в условиях Дятьковского района

Примечание: наименование населённых пунктов соответствует обозначениям рисунка 1.

ных пунктах это превышение недостоверно ($t_{факт}<t_{табл}$). Выявляется ряд чувствительности древесных растений к аэрозагрязнению по степени уменьшения глутатиона, а, следовательно, возрастание устойчивости к стрессам данной дендрофлоры: *Picea abies* > *Thuja occidentalis* > *Syringa vulgaris* > *Acer platanoides* > *Tilia cordata* > *Sorbus aucuparia*. Составлен ряд по степени уменьшения средних значений КУ по содержанию глутатиона в древесных растениях: г. Дятьково > д. Березино > пгт. Любохна > пгт. Старь> пгт. Ивот > п. Дружба > д. Верхи > с. Немеричи >с. Слободище. С увеличением аэрозагрязнения возрастают средние значения КУ.

Содержание глутатиона в фитомассе древесных и кустарниковых растений в шести населённых пунктов района (г. Дятьково, д. Березино, пгт. Любохна, пгт. Старь, пгт. Ивот) достоверно выше контроля в 1,20–1,37 раза ($t_{факт}>t_{табл}$, P=99,0 %). В остальных четырёх населенных пунктах это превышение недостоверно ($t_{факт}<t_{табл}$). Концентрация витамина Е закономерно возрастает с увеличением степени загрязнения воздуха. Ряд по степени уменьшения содержания витамина Е в листьях растений, а, следовательно, и возрастание сопротивления к стрессам (увеличения адаптивной реакции): *Picea abies* > *Thuja occidentalis* > *Sorbus aucuparia* > *Tilia cordata* > *Syringa vulgaris* > *Acer platanoides*.

По сравнению с контролем КУ по содержанию витамина Е в Дятьковском районе ($t_{факт}>t_{табл}$, P=99,0 %) отличается в 0,61–2,30 раза достоверно только в населённых пунктах: г. Дятьково, д. Березино, пгт. Любохна, пгт. Старь, пгт. Ивот. Выявлена положительная связь биохимических показателей древесных растений и мониторинговых комплексных индексов, предложенных в системе Росгидромета. На рисунке 4 представлена регрессионная зависимость индекса загрязнения атмосферы (ИЗА) и средних значений КУ по содержанию общего азота в биомассе в условиях Дятьковского района. Наблюдается прямая зависимость между параметрами: с увеличением степени загрязнения растет средние значения КУ по содержанию общего азота в биомассе модельных деревьев. Величина достоверности аппроксимации составила 0,9072, что свидетельствует о положительной корреляции между параметрами (tфак>tтаб).

На рисунке 5 представлена регрессионная зависимость ИЗА и среднего КУ по содержанию глутатиона в биомассе древесных растений в условиях Дятьковского района. Прямая зависимость между параметрами свидетельствует о том, что с увеличением степени загрязнения растет средний показатель КУ по содержанию глутатиона в биомассе. Величина достоверности аппроксимации составила 0,8478, что свидетельствует о положительной корреляции между параметрами ($t_{факт}>t_{табл}$).

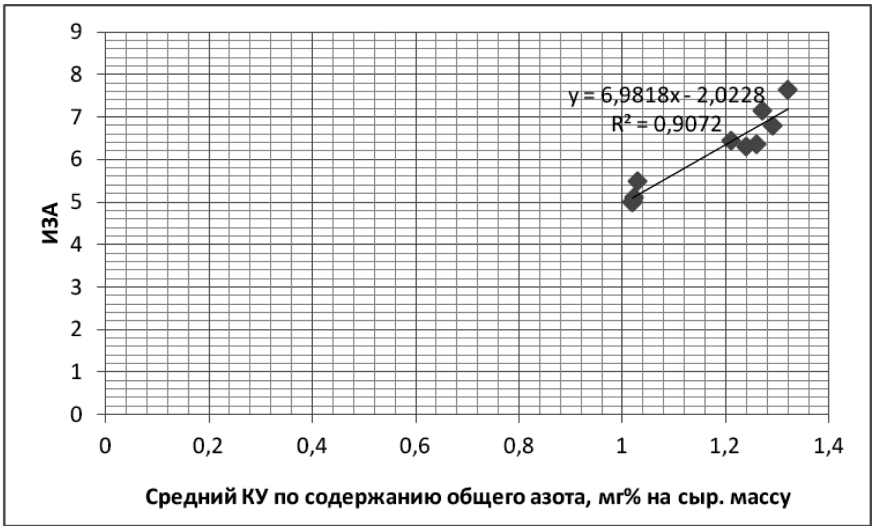


Рис. 4. Регрессионная зависимость ИЗА и среднего КУ по содержанию общего азота в биомассе в условиях Дятьковского района (2023–2025 гг.)

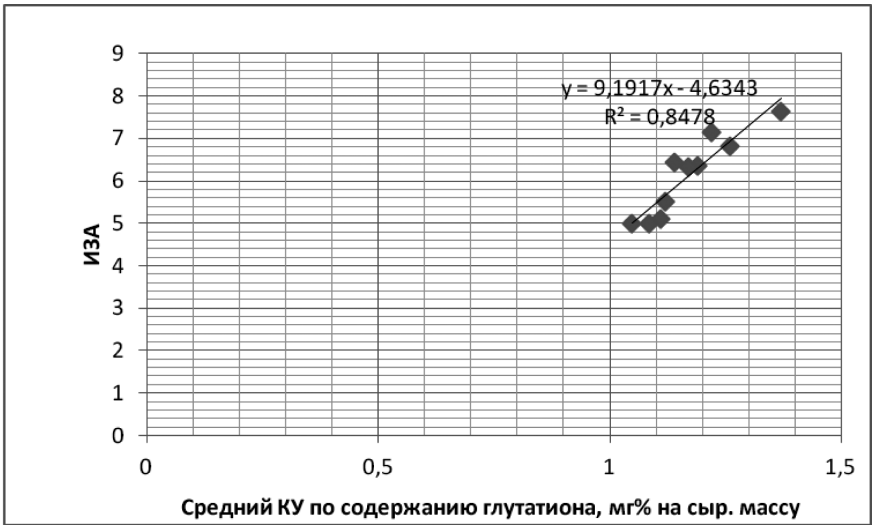


Рис. 5. Регрессионная зависимость ИЗА и среднего КУ по содержанию глутатиона в биомассе в условиях Дятьковского района (2023–2025 гг.)

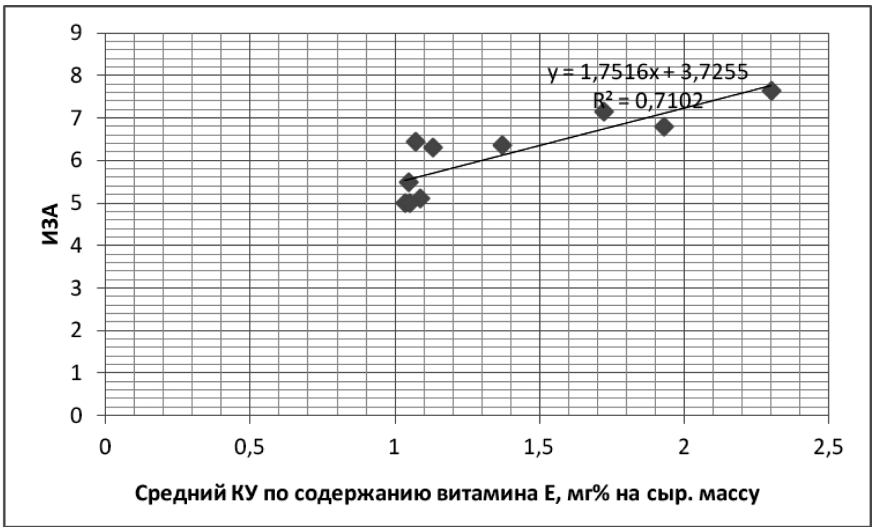


Рис. 6. Регрессионная зависимость ИЗА и среднего КУ по содержанию витамина Е в биомассе в условиях Дятьковского района (2023–2025 гг.)

На рисунке 6 представлена регрессионная зависимость ИЗА и среднего КУ по содержанию витамина Е в биомассе в условиях Дятьковского района.

Прямая зависимость между параметрами подтверждает тенденцию: средний КУ по содержанию витамина Е в биомассе возрастает по мере увеличения степени загрязнения. Величина достоверности аппроксимации составила 0,7102, что свидетельствует о положительной корреляции между параметрами ($t_{факт} > t_{табл}$).

Заключение

Полученные результаты исследования показали, что древесные растения испытывают существенное влияние загрязнения воздуха. Впервые полученные и представленные для условий староосвоенного региона биохимические данные адекватно согласуются с инструментальными результатами и ежегодно рассчитываемыми индексами загрязнения. Биохимические показатели древесных растений рекомендуется использовать в биомониторинге, а выявленные спектры резистентности дендрофлоры учитывать при сравнительных исследованиях. Наивысшую чувствительность к загрязнению в исследованиях показали хвойные растения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rai P.K., Panda L.L.S. Roadside plants as bio indicators of air pollution in an industrial region, Rourkela, India // International Journal of Advancements in Research & Technology. 2015.Vol. 4, Issue 1, Pp. 15–36.
2. Щенникова А.В., Филюшин М.А., Кочиева Е.З. Стессовая память растений: ключевые аспекты (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2025. Т. 60. № 3. С. 397–414.
3. Barjoee S.S., Malverdi E., Kouhkan M., Alipourfard I., Rouhani A., Farokhi H., Khaledi A. Health assessment of industrial ecosystems of Isfahan (Iran) using phytomonitoring: chemometric, micromorphology, phytoremediation, air pollution tolerance and anticipated performance indices // Urban Clim. 2023. 48:101394. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101394
4. Odafevejiri A. P. Impact of air pollution on proline and soluble sugar content of selected plant species. Chemistry and Materials Research, 8(5). 2016. Pp.72–76.
5. Тарчевский И.А., Егорова А.М. Участие пролина в адаптации растений к действию стресс-факторов и его использование в агробиотехнологии (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2022. Т. 58. № 4. — С. 315–329.
6. Sisodia A., & Dutta, S. Air pollution tolerance index of certain plant species: a study of National Highway no-8, India. Journal of Environmental Research and Development, 10(4), 2016. Pp. 723–728.
7. Zhang P., Liu, Y., Chen X., Yang Z., Zhu M. & Li Y. Pollution resistance assessment of existing landscape plants on Beijing streets based on air pollution tolerance index method. Ecotoxicology and Environmental Safety, 132, 2016. Pp. 212–223
8. Kaur M. & Nagpal A.K., Evaluation of air pollution tolerance index and anticipated performance index of plants and their application in development of green space along the urban areas. Environmental Science and Pollution Research, 24(23), 2017. Pp. 18881–18895
9. Kwak M. J., Lee J.K., Park S., Lim Y.J., Kim H., Nam Kim K.N., Je S.M., Park C.R. and Woo S.Y. Evaluation of the Importance of Some East Asian Tree Species for Refinement of Air Quality by Estimating Air Pollution Tolerance Index, Anticipated Performance Index, and Air Pollutant Uptake. Sustainability 2020, 12, 3067. doi:10.3390/su12073067
10. Hazarika B., Khangia U., Shekhar Datta H. Air pollution tolerance index and anticipatory performance index of horticultural plants as a tool for assessing air quality: A review // The Pharma Innovation Journal. 2023. 12 (5). Pp. 2626–2631.
11. Jose A. Ananthan Ch., Reshmi G. Assesing Air Pollution Tolerance: a Stady of Roadside Plants // Journal of Stress Physiology and Biochemistry. 2025. № 2. Vol. 21. Pp. 201–215.
12. Patel K., Chaurasia M., Rao K.S. Urban dust pollution tolerance indices of selected plant species for development of urban greenery in Delhi // Environ Monit Assess. 2023. 195(1). 16. https://doi.org/10.1007/s10661-022-10608-5
13. Bhadauria S., Dixit A., Singh D. Estimation of air pollution tolerance and anticipated performance index of roadside plants along the national highway in a tropical urban city // Environ Monit Assess. 2022. 194. 808. https://doi.org/10.1007/s10661-022-10483-0
14. Башмаков Д.И. Индекс адаптации растений к тяжёлым металлам // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2022. № 2. С. 84–94. doi:10.21685/2307-9150-2022-2-8
15. Нестеренко В.М., Москаленко И.В., Авраменко М.В., Анищенко Л.Н. Дополнения к долговременной оценке среды урбоэкосистем с использованием фоновых видов астений зелёных зон // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2024. Т. 16. № 4. — С. 105–125.
16. Рогожин В.В., Рогожина Т.В. Практикум по физиологии и биохимии растений. СПб.: ГИОРД, 2013. 352 с.
17. Брянская область в цифрах. 2024: Крат. Стат. Сб. // Брянскстат. Брянск, 2024.185 с.
18. ГОСТ 17.4.4.02-84. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа // [Электронный ресурс] / Справ.-правовая система «КонсультантПлюс». URL: http: // www.consultant.ru.
19. Руководство ЕМЕП по отбору проб и химическому анализу / пер. с англ.; под ред. А.Г. Рябошапко. Kjeller, 2001: [site of NILU]. [Электронный ресурс]: http://tarantula.nilu.no/projects/ccc/manual/index.html.

© Земскова Лолита Алексеевна (eco_egf@mail.ru); Нестеренко Виктория Михайловна (vivo.mih@gmail.com);
Авраменко Марина Васильевна (avramenko_marina84@mail.ru); Анищенко Елизавета Игоревна (liza_anisch@mail.ru);
Анищенко Лидия Николаевна (Lanishchenko@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.23

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СТАТУСА ПОДРОСТКОВ КОРЕННОГО И ПРИШЛОГО НАСЕЛЕНИЯ СЕВЕРА ХАБАРОВСКОГО КРАЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ СРЕДЫ

FORMATION OF THE MICROELEMENT STATUS OF THE INDIGENOUS AND ALIEN ADOLESCENTS ON THE NORTH OF KHABAROVSKY KRAI UNDER THE INFLUENCE OF BIOGEOCHEMICAL ENVIRONMENTAL FACTORS

A. Nesterenko
E. Tselih

Summary. An ecological and hygienic assessment of the formation of the microelement status of adolescents of the indigenous and Russian population living in the Okhotsky and Nikolaevsky districts of the Khabarovsky Kray was carried out under the influence of biogeochemical factors (the content of microelements in the soil, drinking water and food rations). We identified the imbalance of essential and toxic microelements (Se, Zn, Mo, Fe, Cu, U, Th) in environmental components (water, soil) and their migration along the food chain for each region. We established direct correlations between the chemical composition of water, soil, local food products and the microelement status of adolescents, which confirms the influence of the biogeochemical province on public health.

Keywords: microelements, hair, water, soil, health biogeochemical province.

Нестеренко Алена Олексовна
старший преподаватель, Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск)
alenushka_3@inbox.ru
Целых Екатерина Дмитриевна
доктор биологических наук, профессор, Дальневосточный государственный университет путей сообщения (г. Хабаровск)
celixed@mail.ru

Аннотация. Проведена эколого-гигиеническая оценка формирования микроэлементного статуса подростков коренного и пришлого населения, проживающих в Охотском и Николаевском районах Хабаровского края, под влиянием биогеохимических факторов (содержания микроэлементов в почве, питьевой воде и пищевых рационах). Выявлен дисбаланс эссенциальных и токсичных микроэлементов (Se, Zn, Mo, Fe, Cu, U, Th) в компонентах окружающей среды (вода, почва) и их миграция по пищевой цепочке для каждого района. Установлены прямые корреляционные взаимосвязи между химическим составом воды, почвы, местными продуктами питания и микроэлементным статусом подростков, что подтверждает влияние биогеохимической провинции на здоровье населения.

Ключевые слова: микроэлементы, волосы, вода, почва, здоровье биогеохимическая провинция.

Актуальность исследований содержания микроэлементов в биологических субстратах, разработка донозологических критериев определения микроэлементозов имеет под собой общебиологическое обоснование [1]. Согласно современным исследованиям, в процессе эволюции живые организмы успешно приспосабливаются к специфике химического состава воды, продуктов местного производства, воздуха того или иного региона. Однако именно вода и минеральные вещества явились основой эволюции растений и животных, включая человека. Условием онтогенеза является оптимальное и стабильное содержание микроэлементов в среде, являющихся пластичной константной организма. Согласно современным воззрениям, элементная система является первичной основой всех современных механизмов регуляции (нервных, эндокринных, иммунных и др.), представляющих собой надстройку у высших организмов [2].

Общеизвестна роль некоторых эссенциальных химических элементов (цинк, селен, хром) в становлении функций организма: репродуктивной функции у мужчин (цинк, селен, хром) и у женщин (марганца, меди), пищеварительной (цинка, магния), нервной (цинка, меди, железа, натрия), метаболической (цинка, хрома, йода, марганца, молибдена, кобальта, железа) и т.д. [3–5].

В то же время влияние токсичных веществ (свинец, кадмий, ртуть и др.) детерминирует полиморфные нарушения в онтогенезе: функционирование цинкзависимых ферментов (около 200), отставания в развитии первич-

ных и вторичных половых признаков, угнетение сперматогенеза, снижение когнитивных способностей, лимфопения и, как следствие, иммунодефициты [6].

Согласно теории В.В. Вернадского все живые организмы связаны между собой и окружающей средой потоком энергии и круговоротом веществ. Привнесение в компоненты среды различных контаминантов проводит к вовлечению их в эти процессы и накоплению их в организме промежуточных или конечных звеньев. Увеличение концентрации приводит к развитию микроэлементозов. Таким образом, химический состав рациона питания является основным посредником (медиатором) между химическим составом среды (почва, вода) и биохимическим статусом организма подростов (химический состав волос и крови).

Понижение уровня здоровья коренного населения, вызванное существенными нарушениями традиционной системы питания и образа жизни, затрагивает вопросы о разработке рекомендаций по коррекции питания. При этом следует учитывать весь комплекс накопленных различными группами проживающего на Севере населения традиций в отношении системы питания и образа жизни [2].

Цель работы — провести эколого-гигиеническую оценку формирования микроэлементного статуса подростков коренного и пришлого населения, проживающих в северных районах Хабаровского края, под влиянием биогеохимических факторов (содержания микроэлементов в почве, питьевой воде и пищевых рационах).

Материала и методы

Проведено эколого-биологическое обследование детей подросткового периода и территории их проживания. Выбраны группы подростков, проживающих на севере Хабаровского края (п. Арка Охотского района, эвены n=64, русские, n=38), в центральной части Хабаровского края (п. Лазарев Николаевского района, нивхи n=35, русские, n=38). Обследование проводилось без учета пола, средний возраст 14,57±0,94. Проведен анализ проб волос на определение концентрации микроэлементов Fe, Cu, Mo, Zn, Co, Se, Th и U.

Пробы питьевой воды (n=40) были взяты в местах компактного проживания подростков Охотского и Николаевского районов в течение года по сезонам. Почвенные образцы были взяты на земельных участках (n=20). Отбор почвенных образцов производился однократно в осенний период.

Определение содержания микроэлементов (МЭ), (Fe, Cu, Mo, Zn, Co, Se, Th и U) в волосах, питьевой воде и почве проведено на базе Хабаровского инновационно-аналитического центра Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой, с анализом образцов на приборе ICP-MS ELAN DRC II PerkinElmer (США).

Анализ проб рационов питания подростков (n=40) выполнен методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Agilent 8800 x (Agilent Techn., США) на базе Дальневосточного геологического института ДВО РАН. Было проанализировано содержание Fe, Cu, Mo, Zn, Co, Se, Th и U в пробах пищевого рациона.

Статистический анализ проведен с использованием стандартных методов вариационной статистики с использованием пакета Microsoft Excel [7].

Результаты и обсуждение

Исследование путей миграции химических элементов из окружающей среды в организм человека является ключевым для понимания процессов аккумуляции и выведения потенциально токсичных и эссенциальных веществ.

На Рис. 1 представлены результаты спектрального анализа содержания микроэлементов (Fe, Cu, Co, Zn, Mo, Se, Th, U) в пробах питьевой воды и почвы, отобранных в Охотском и Николаевском районах Хабаровского края.

Анализ полученных результатов показал, что для большинства проб питьевой воды (82 %) Охотского района характерно превышение содержания Fe по сравнению с ПДК более чем в 5 раз, что, вероятно, связано с высоким содержанием гуминовых веществ, типичным для северных водоемов [8]. Также в большинстве проб питьевой воды установлен избыток Cu и Zn ($p<0,001$). Регулярное потребление воды с высоким содержанием эссенциальных элементов представляет риск токсического воздействия на печень и нервную систему [9].

В питьевой воде Охотского района наблюдается дефицит Co, Mo и Se (10–78 %, $p<0,001$). Низкая концентрация Se в воде создает предпосылки для недостаточного поступления в организм населения, особенно зависящего от местных пищевых ресурсов. Данное наблюдение является критически важным, поскольку дефицит Se, характерный для многих северных территорий, напрямую ассоциирован с риском развития эндемических микроэлементозов, таких как болезнь Кешана (кардиомиопатия) или болезнь Кашина-Бека (остеоартропатия), [10–11].

В питьевой воде Николаевского района также отмечается избыток Fe, Co, Zn ($p<0,001$). В пробах питьевой воды

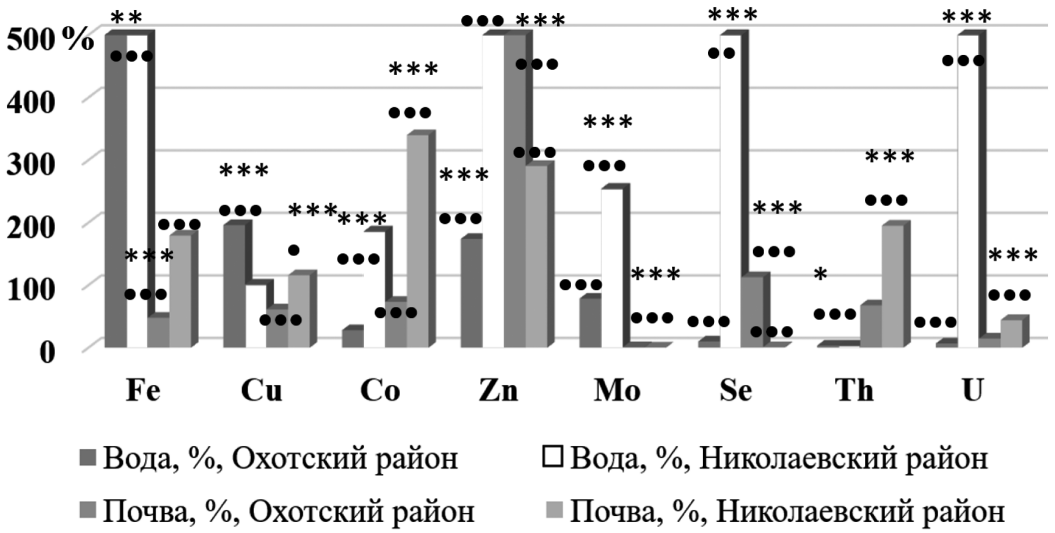


Рис. 1. Средние показатели (M±m) содержания химических элементов в пробах воды и почвы Охотского и Николаевского районов Хабаровского края (в % от ПДК)

Примечание: соответствие концентрации ПДК показано в процентах (%); значения выше 100 % свидетельствуют о превышении ПДК, ниже 100 % — о его дефиците. Здесь и далее: достоверные различия характеристик между районами показаны: p≤0,05 (*); p≤0,01 (**); p≤0,001 (***); достоверные различия концентрации химических элементов с ПДК показаны: p≤0,05 (•); p≤0,01 (••); p≤0,001 (•••)

(56 %) обнаружены высокие концентрации U (p<0,001). Примеси радиоактивных элементов могут быть связаны с естественными геологическими процессами, происходящими в Николаевском районе (активный рудогенез, связанный с выходом различных химических элементов, в том числе Th и U на поверхность), [12]. Концентрации остальных микроэлементов находятся в пределах ПДК.

Таким образом, анализ проб питьевой воды в местах компактного проживания коренного и пришлого населения показал достоверные межрайонные различия по содержанию Fe, Cu, Co, Zn, Se, U (p<0,001).

Анализ почвенного покрова Охотского района выявил высокую концентрацию Zn, превышающую норматив в 5,33 раза (p<0,001). Содержание Fe, Cu, Zn, Mo, Se, Th и U в пределах норматива. Присутствие примесей радиоактивных элементов (Th и U) является аномалией для малозаселенных районов, удаленных от промышленных центров, возникающих в следствие природной геохимической специфики, обусловленной составом коренных пород (например, широким распространением гранитоидов, содержащих акцессорные минералы этих элементов), [13].

В почвах Николаевского района наблюдаются избыточные концентрации Fe, Cu, Co, Zn, Th (p<0,01-0,001). Содержание представленных элементов в почвах Николаевского района достоверно выше по сравнению с Охотским районом, располагающимся севернее (p<0,001).

Причины неравномерного распределения эссенциальных и радиоактивных элементов, в первую очередь, носят природный (геохимический) характер. Дефицит подвижных форм Se и Mo в почвах и водах обусловлен процессами интенсивного выщелачивания в условиях кислых, бедных органическим веществом почв и высокой влажности в северных районах, что приводит к миграции этих элементов за пределы местного биогеохимического цикла [10].

Для установления корреляционных связей влияния биогеохимической провинции на микроэлементый статус подростков (фактическим поступлением микроэлементов в организм) был проведен анализ элементного состава среднесуточных рационов питания подростков, постоянно проживающих в изучаемых районах (Рис. 2). Проведен сравнительный анализ полученных данных с рекомендуемыми суточными нормами потребления для соответствующей возрастной группы.

В среднесуточных рационах изучаемых районов выявлено избыточное содержание Zn (153,18–174,53 %, p≤0,001) и дефицитное Fe, Cu, Co (p≤0,001). В среднесуточном рационе питания подростков Николаевского и Охотского районов установлены высокие концентрации U.

В рационах подростков Охотского района наблюдается дефицит Se, который коррелирует с его низким содержанием в воде (r=0,396), (Рис. 1). Также высокие концентрации Zn и дефицитные Mo в пробах питьевой воды согласуется с их дисбалансом в пищевом рацио-

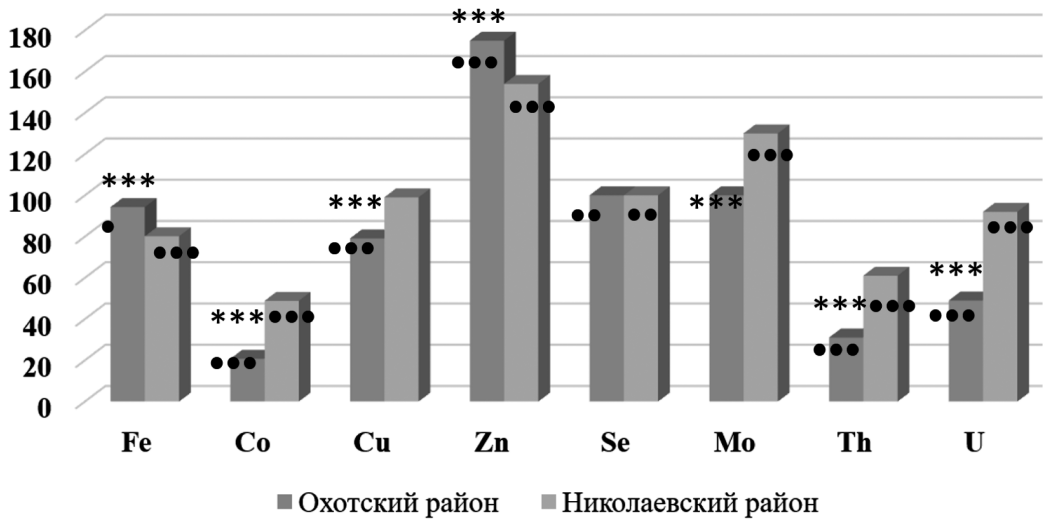


Рис. 2. Концентрация (M±m) химических элементов в среднесуточном рационе питания подростков, проживающих в северный районах Хабаровского края (в % от физиологического норматива)

не. При этом содержание Fe близко к рекомендованной норме, что, вероятно, компенсируется пищевыми источниками, несмотря на его избыток в воде. Повышенным фактором риска является присутствие Th и U в пробах суточных рационов, несмотря на соответствие фоновым значениям. Это указывает на активную миграцию данных радиоактивных элементов из обогащенных почв (Рис. 1) по пищевым цепям.

Результаты химического анализа среднесуточных рационов подростков Николаевского района достоверно отличаются от показателей в Охотском районе. Потребление Zn и Mo подростками Николаевского района превышает физиологический норматив в 1,30–1,54 раза ($p \leq 0{,}001$). Поступление Fe, Co, Se с пищей снижено, концентрация Cu — на нижней границе физиологического норматива. Обнаруженные примеси U и Th в рационах подтверждают их способность мигрировать по пищевым цепям.

Таким образом, анализ фактического питания подтвердил влияние биогеохимических особенностей среды на химический состав пищевых рационов населения (содержащих продукты местного производства).

Достоверные различия в особенностях биогеохимических провинциях северных районов Хабаровского края и различия химического состава среднесуточных рационов питания формируют принципиально разные биохимические предикторы для здоровья подростков и требуют дифференцированного подхода при оценке микроэлементного статуса и разработке профилактических мероприятий.

Волосы человека признаны ценным неинвазивным биосубстратом для ретроспективной оценки аккумуляции химических элементов. Поступление элементов с пищей и водой в системный кровоток и их последующее накопление в волосяном покрове отражает среднюю концентрацию этих элементов в организме за продолжительный период времени [14]. Результаты анализа химического состава волос подростков разных национальностей, проживающих в северных районах Хабаровского края представлены на Рис. 3.

Анализ химического состава волос показал следующие результаты: концентрация Fe в группах Охотского района находится вблизи референтных значений тогда, как в группах Николаевского района установлен избыток Fe в 1,70–2,79 раза выше физиологического норматива ($p \leq 0{,}001$). У всех обследованных групп, независимо от этнической принадлежности и места проживания, отмечается дефицит Cu, Co, Se, Mo. Дефицит Zn в группах Охотского района, в то время у нивхов и русских Николаевского района его концентрация составляет 135–146 %.

Во всех этнических группах наблюдается аккумуляция радиоактивных элементов в волосах. Установлены достоверно повышенные, в сравнении с русским населением, концентрации Th и U в биосубстрате подростков коренных этнических групп (эвенов и нивхов), ($p \leq 0{,}001$). Полученные данные согласуются с современными исследованиями, указывающими на то, что традиционная пища коренных народов Севера, основанная на потреблении местных биологических ресурсов, может являться значимым путем поступления в организм не только эссенциальных, но и потенциально токсичных элементов, присутствующих в биогеохимической провинции [15, 16]. Выявленный дефицит ряда жизненно важных микроэлементов, таких как Se и Mo, является характерной чертой микроэлементного статуса жителей Арктической и Субарктической зон России и рассматривается

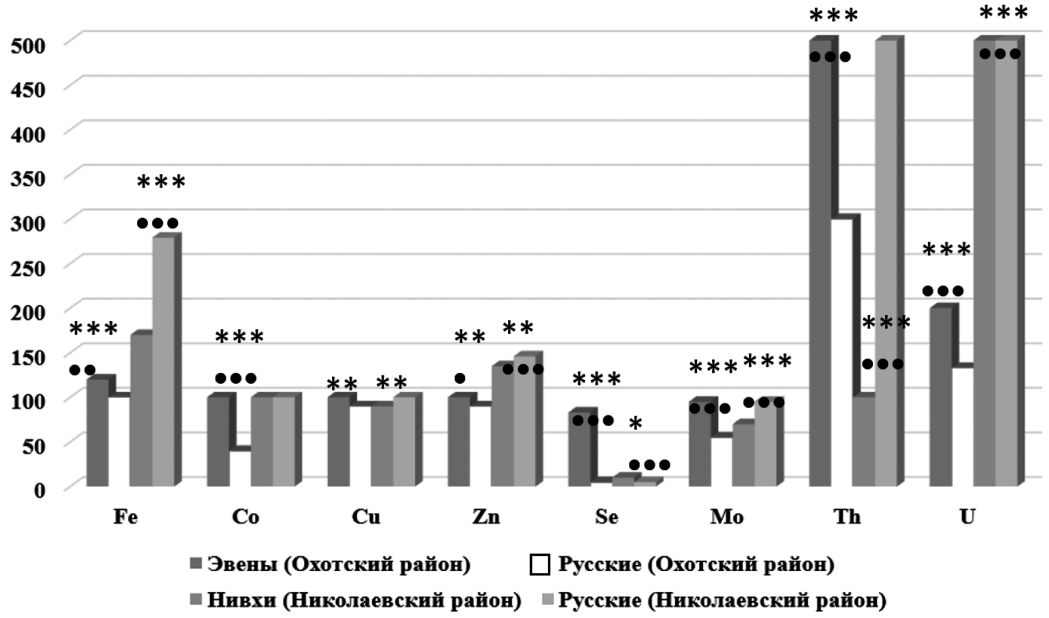


Рис. 3. Концентрация (M±m) химических элементов в волосах подростков коренного (нивхи, эвены) и пришлого населения (русские), проживающих в северный районах Хабаровского края (в % от физиологического норматива)
Примечание: достоверные различия характеристик между этническими группами, проживающими в одном районе: p≤0,05 (*); p≤0,01 (**); p≤0,001 (***); достоверные различия концентрации химических элементов с физиологическим нормативом показаны: p≤0,05 (•); p≤0,01 (••); p≤0,001 (•••)

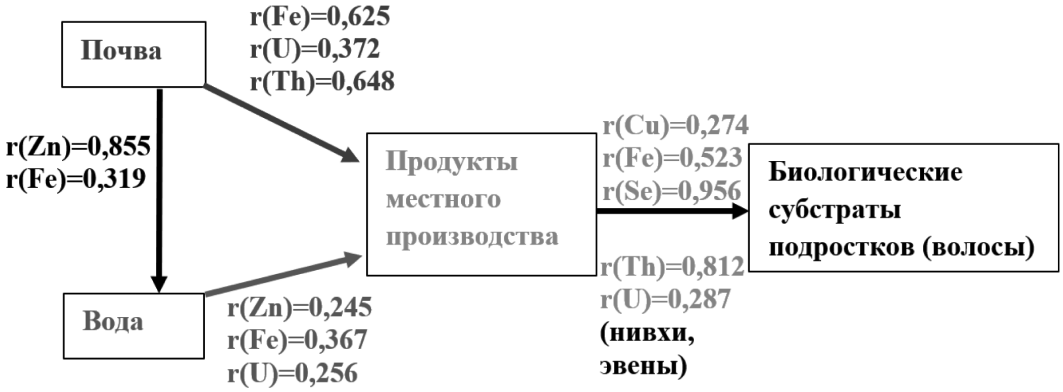


Рис. 4. Корреляционные связи накопления химических элементов в компонентах окружающей среди и их миграция

как один из факторов риска нарушения адаптационных процессов и развития экологозависимых заболеваний в данных регионах [17].

Основным источником поступления микроэлементов служит алиментарный путь (с пищей и питьевой водой), который начинается с абсорбции их растениями из воды и почвы с последующим переходом в продукты питания животного происхождения [11]. Данный процесс, известный как биоаккумуляция, может приводить к значительному увеличению концентраций некоторых металлов и радиоактивных элементов (например, Cd, Pb, Co, Th, U) на более высоких трофических уровнях. Таким образом, пищевые продукты становятся центральным звеном, связывающим геохимические особенности Хабаровского края с внутренней средой организма, что подтверждают установленные «средние» и «сильные» корреляционные взаимосвязи, проиллюстрированные на Рис. 4.

Результаты расчета корреляционных связей иллюстрируют взаимосвязь всех компонентов окружающей среды и отражают круговорот веществ. Так в продукты местного производства из воды и почвы поступают Fe, Zn, U, Th (r=0,245–0,648). Химические элементы, поступающие с пищей, аккумулируются в биологических субстратах человека, что подтверждают корреляционные связи высокого содержания Th, U и низкого содержания Fe, Cu, Se (r=0,274–0,956).

Естественная радиоактивность в пищевых продуктах, способствующих радиационному воздействию на человека, в основном вызвана долгоживущими радионуклидами цепи распада урана (уран-238, уран-234), радия

(радий-226, радия-228) и тория (торий-230, торий-232 и торий-228). Ведущее значение этих изотопов обусловлено их сравнительно большим выходом при делении ядер урана и плутония, способностью хорошо мигрировать в биосферных средах и по пищевым цепочкам к человеку (часто увеличивая свою концентрацию в ряду от продуцентов до консументов), свойством хорошо усваиваться из пищи. Загрязнение каждого звена может носить поверхностный и структурный характер. В последнем случае в ходе метаболических процессов в предыдущих звеньях радионуклиды накапливаются в форме биокомплексов в органах и тканях растительных и животных организмов [18].

Заключение

Таким образом, установлены биогеохимические особенности северных районов Хабаровского края. Для Охотского района характерен дефицит Se, Zn и Mo и избыток Fe в водных объектах и на фоне природной радиохимической аномалии в почвах. В Николаевском районе установлен дефицит Mo и высокие концентрации Cu, U и Th в почве. Химический состав компонентов среды отражается на содержании этих микроэлементов в местных продуктах. Установлены средние и сильные корреляционные связи Fe, Zn, U, Th между пробами воды, почвы и среднесуточными рационами питания подростков.

Результаты анализа волос выявили зависимость микроэлементного статуса подростков от особенностей биогеохимической провинции.

Таким образом, анализ элементного состава волос позволяет не только оценить нутриентный статус или уровень воздействия токсикантов, но и провести оценку миграции элементов по цепочке «почва/вода — пища — биосустраты человека (волосы)» [19]. Выявленная специфика районов является объективной основой для разработки эколого-гигиенических рекомендаций по питанию подросткового населения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожин А.А. Микроэлементозы как предикторы задержки полового развития мальчиков-подростков / А.А. Кожин, В.А. Попова, М.А. Даурбекова и др. // Международный журнал экспериментального образования, 2014. — № 3-2. — С. 49–55.
2. Трошина Т.И., Морозова О.М., Воробьёва Н.А. Трансформационные процессы и фактор питания в системе жизнестойкости жителей Крайнего Севера // Арктика и Север, 2021. — № 43. — С. 190–214.
3. Оберлис Д. Биологическая роль макро- и микроэлементов у человека и животных / Д. Оберлис, Б. Харланд, А.В. Скальный. — СПб.: Наука, 2008. — 544 с.
4. Олексюк З.Я., Конкабаева А.Е., Алшинбекова Г.К. Роль макро и микроэлементов в патогенезе невротических расстройств у детей // Биология и интегративная медицина, 2024. — С. 147–152.
5. Филимонов Р.М. Роль микроэлементов питьевых минеральных вод в метаболических процессах желудочно-кишечного тракта / Р.М. Филимонов, А.Д. Фесюн, Т.Р. Филимонова, О.О. Борисевич // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология, 2022. — Т. 204(8). — С. 179-189.
6. Ших Е.В. Клинико-фармакологические аспекты применения витаминно-минеральных комплексов у женщин в период беременности / Е.В. Ших, Л.И. Ильенко — М.: ИД «Медпрактика», 2007. — 80 с.
7. Ермолаев О.Ю. Математическая статистика для психологов / О.Ю. Ермолаев. — М.: Московский психол.-соц. ин-т. Из-во Флинт, 2003. — С. 19–72.
8. Моисеенко Т.И. Водная экотоксикология: теоретические и прикладные аспекты. — М.: Наука, 2009. — 400 с.
9. Всемирная организация здравоохранения. Руководство по контролю качества питьевой воды. 4-е изд., включающее 1-е дополнение. Рекомендации. — Женева: ВОЗ, 2017. — Т. 1. — 178 с.
10. Говорун, В.А., Жуковский, М.В. Проблема дефицита селена в России и пути ее решения // Гигиена и санитария. — 2019. — Т. 98, № 5. — С. 508–514.
11. Skalny A.V. et al. Selenium deficiency as a common feature of endemic diseases in Russia / A.V. Skalny et al. // Environmental Geochemistry and Health. — 2020. — Vol. 42. — P. 2503–2512.
12. Коковкин А.А. Новейшая структура Сихотэ-Алинского орогена, металлогения Сихотэ-Алинской рудной провинции / А.А. Коковкин // Региональная геология и металлогения, 2013. — № 53. — С. 1–9.
13. Язиков Е.Г. Геохимия техногенных радионуклидов: торий и уран / Е.Г. Язиков, А.В. Таловская. — Томск: STT, 2013. — 256 с.
14. Kempson I.M. Hair analysis as a biomonitor for toxicology, disease and health status / I.M. Kempson, E. Lombi // Chemical Society Reviews, 2011. — Т. 40(7). — P. 3915–3940.
15. Аветисян Л.А., Тихонова И.В., Кислицин В.А. Химические элементы в организме человека и животных в условиях Арктики: баланс пользы и риска // Экология человека. 2021. № 4. С. 45–54.
16. Соркина О.В. Особенности накопления тяжелых металлов и микроэлементов в традиционных пищевых продуктах коренных малочисленных народов Севера / О.В. Соркина // Вопросы питания, 2023. — Т. 92. — № 1. — С. 67–76.
17. Ревич Б.А. Биомониторинг химических элементов в оценке риска для здоровья населения Арктической зоны России // Гигиена и санитария, 2020. — Т. 99. — № 9. — С. 977–984.
18. Перевезева Э.В. Питание современного человека: путь развития или деградации? / Э.В. Перевезева, С.Н. Филиппова // Вестник РМАТ, 2015. — № 4. — С. 3–5.
19. Chojnacka K. The bioavailability of microelements from dietary supplements / K. Chojnacka, A. Saeid, P. Rutkowski, M. Mikulewicz // Food Chemistry, 2010. — Т. 120(4). — P. 1264–1269.

© Нестеренко Алена Олексовна (alenushka_3@inbox.ru); Целых Екатерина Дмитриевна (celixed@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.31

ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛОСЯНОГО ПОКРОВА У СУРКОВ СТЕПНЫХ (MARMOTA BOBAK MULL., 1776) В ПОСТНАТАЛЬНОМ ОНТОГЕНЕЗЕ

FORMATION OF THE HAIR COVER IN STEPPE MARMS (MARMOTA BOBAK MULL., 1776) IN POSTNATAL ONTOGENESIS

O. Fedorova
E. Orlova
E. Larina

Summary. The article presents the results of the dynamics of hair formation in steppe marmots (*Marmota bobak* Mull., 1776) at different stages of postnatal ontogenesis. The formation of primary fur and the shedding of juvenile hair were studied in 57 puppies (12 litters) from an experimental herd of marmots. Monthly examinations of the young animals (from 1 month to the beginning of shedding) included assessments of the structure, shine, density, color of the hair, the strength of the hair-skin connection, and skin pigmentation. Research results have shown that newborn steppe marmots are born naked, with pink skin. On the second day, they develop a undercoat of hair, and their skin turns purple-gray. By the age of one month, marmots have a thick golden-colored coat with a dark gray veil. The height of the undercoat on the dorsal and lateral parts of the body reaches 21 mm. Secondary hair growth begins at the age of 60–65 days, and complete replacement of the juvenile hair cover is completed by the 80th–90th day of life.

Keywords: steppe marmots, experimental farm, hair growth, coloring.

Федорова Оксана Ивановна
доктор биологических наук, ФГБОУ ВО «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина»
ox_fed@mail.ru
Орлова Елена Александровна
кандидат сельскохозяйственных наук, ФГБОУ ВО «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина»
Ларина Елена Евгеньевна
доктор биологических наук, ФГБОУ ВО «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина»

Аннотация. В статье приведены результаты динамики формирования волосяного покрова у степных сурков (*Marmota bobak* Mull., 1776) на этапах постнатального онтогенеза. Формирование первичного опушения и линьку ювенального волосяного покрова исследовали у 57 щенков (12 пометов) экспериментального стада сурков. Ежемесячные осмотры молодняка (с 1 месяца до начала линьки) включали оценку структуры, блеска, пышности, цвета волосяного покрова, прочности связи волос с кожей и пигментации кожи. Результаты исследований показали, что новорожденные щенки степных сурков появляются на свет голыми, с кожей розового цвета. На второй день появляются подрост волос, при этом окраска кожи становится фиолетово-серой. К месячному возрасту сурчата обладали густым волосяным покровом золотистого цвета с темно-серой вуалью. Высота опушения на спинно-боковой части тела достигла 21 мм. Рост вторичных волос начался в возрасте 60–65 суток, а полное замещение ювенального волосяного покрова завершается к 80–90-му дню жизни.

Ключевые слова: сурки степные, экспериментальная ферма, рост волос, окраска.

Введение

Сурки относятся к отряду грызуны — Rodentia Bowdich, 1821, семейству беличьи — Sciuridae Gray, 1821, роду сурков — Marmota Frisch, 1975.

В мире описано 14 видов сурков, на территории Российской Федерации обитает 5 видов [1,2]:

1. Степной, или байбак (*M. bobak*);
2. Серый, или алтайский (*M. baibacina*);
3. Монгольский, или тарбаган (*M. sibirica*);
4. Камчатский, или черношапочный (*M. camschatica*);
5. Сурок Кащенко, или лесостепной (*M. kastschenkoi*).

Главная отличительная особенность сурков — зимняя спячка, которая может продолжаться от 180 до 240 дней в году, примерно с июля-сентября до февраля-апреля. Байбак европейский (*Marmota bobak*, Muller, 1776) — самый крупный представитель рода сурков (максимальный вес среди отловленных составил 10,3 кг) — наиболее перспективный подвид для разведения в условиях неволи [2,3].

Материалы и методы

Исследование первичного опушения новорожденных щенков сурков и последующей линьки ювенального волосяного покрова проводили на поголовье экспери-

ментального стада — 57 особей из 12 пометов [5,6]. Работа выполнялась по методике А.П. Русских. Молодняк осматривали ежедневно до начала линьки, то есть до появления нового подроста волос. В ходе наблюдений фиксировали структуру волосяного покрова, степень прочности связи старых волос с кожей, пигментацию кожи, блеск волосяного покрова, его пышность и цвет.

Результаты исследования

Результаты наблюдений за динамикой развития волосяного покрова у сурков в первые месяцы жизни показали, что:

1. Новорожденные сурки рождаются без волосяного покрова, с кожей розового цвета; на второй день окрас кожи становится фиолетово-серым, начинается подрост первичных волос.
2. У новорожденных сурков в возрасте 5-ти суток наблюдается неравномерное распределение волосяного покрова — лоб, лопатки, хребет, бока, хвост покрыты темно-серым низким редким опушением; уши, шея, грудь, брюхо — очень редким светлым пушком; подбородок, горло, подмышечные области, подошвы лап, промежность, внутренние части бедер — голые; кожа верхней стороны туловища темно-синяя, на брюхе красноватая.
3. По состоянию на 15-е сутки морфология волосяного покрова характеризуется зональным распределением. На дорсальных и латеральных поверхностях (лоб, лопатки, хребет, бока), а также на наружной стороне лап отмечается развитие низких густых серых волос; линейная длина волос на боковой поверхности тела варьирует в диапазоне 4–6 мм. На вентральных участках (подбородок, грудь, шея, брюхо) и на внутренней стороне лап волосяной покров более редкий, окраска волос — светло-золотистая.
4. На 20-й день у сурков формируется густой волосяной покров золотистого цвета с черной рябью на следующих участках — лбу, шее, лопатках, наружных сторонах передних лап, боках. При этом окраска здесь светлее, чем на хребте и наружных сторонах лап (верхней половины). Хвост покрыт короткими черными волосами. Волосяной покров на наружных сторонах задних лап (нижней части), ушах, груди, внутренней стороне передних лап, брюхе — светло-золотистого цвета, более редкий, чем на спине. На подбородке белое пятно. Подмышечная область, верхняя и нижняя сторона пальцев, подошвы — голые. Длина волос на боку 7–10 мм. Цвет кожи темно-синий.
5. На 30-е сутки — окраска опушения та же, что и на 18–20 сутки. Заметно увеличилась длина волос. На боку она составляла 12–14 мм. Отдельные кроющие волосы достигали 20 мм.
6. На 45-е сутки — рост ювенальных волос прекратился. Цвет кожи слегка синеватый. Строение корней волос соответствует законченному росту волоса, то есть корень и самая нижняя часть основания стержня чистые, светлые, сердцевинный слой в корнях волос отсутствует.

Таблица 1.

Динамика изменения строения ювенального волосяного покрова у сурчат с месячного возраста до начала линьки

№	Возраст, суток	Количество пометов	Структура волосяного покрова
1	30	8	Все части тела опушены. Волосяной покров на спине невысокий, густой, 2-ярусный; на животе более низкий и редкий. Нижний ярус, состоящий из пуховых волос, на боку достигает 12–14 мм, кроющие волосы на спине с темным основанием (6 мм), золотистым кольцом (9 мм) и темными верхушками (6 мм) образуют верхний, более редкий ярус высотой 21 мм. Кожа темно-синяя. Старые волосы прочно связаны с кожей. Подроста новых волос нет.
2	45	8	Волосяной покров двух ярусный. Длина волос нижнего яруса составляет в среднем 14,5 мм, остевых 26 мм (пигментированное основание остевых волос — 8,5 мм, золотистое кольцо — 10 мм, пигментированная верхушка — 7,5 мм). Кожа слегка синеватая. Подрост новых волос не обнаружен. Старые волосы легко выдергиваются из кожи.
3	55, 60, 65	12	В 55-суточном возрасте ни у одной из 12 особей подрост новых волос не обнаружен. В 60-суточном у 7 (56 %) осмотренных голов отмечен подрост новых волос (0,5–7 мм). В 65-суточном возрасте у всех сурков был обнаружен подрост новых волос от 0,5 до 10 мм. Кожа темно-синего цвета. Старые волосы тусклые, легко выпадают. Новые волосы яркие, блестящие, слущивается эпидермис.
4	80–90	12	Старые волосы отсутствуют. Новые волосы яркие, блестящие, пребывают в стадии роста — в корне имеется сердцевинный слой. Кожа синяя.

По результатам наблюдения за развитием волосяного покрова у 10 особей 65-суточного возраста установлено, что длина волос постепенно увеличивалась, и к 100-суточному возрасту, высота волосяного покрова достигла 23,1 мм, длина пуховых волос 14,5 мм (табл. 2).

Таблица 2.

Высота зимнего опушения у сурков в возрасте 65–100 суток

Возраст, суток	Высота волосяного покрова, мм	Длина пуховых волос, мм
65	12,9±0,1	9,2±0,1
70	14,0±0,2	9,8±0,1
80	19,2±0,1	12,1±0,1
90	22,8±0,1	13,2±0,1
100	23,1±0,3	14,5±0,1

Заключение

На основании проведенных исследований, установлено, что при клеточном разведении сурков степных щенки рождаются голыми с кожей розового цвета. Подрост волос происходит на второй день, и кожа становится фиолетово-серой. К месячному возрасту, сеголетки имеют густой волосяной покров золотистого цвета с темно-серой вуалью, при высоте опушения на спинно-боковой части тела — 21 мм. Подрост вторичных волос начинается в возрасте 60–65 суток. Полностью выпадение ювенального волосяного покрова заканчивается в 80–90 суточном возрасте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Машкин В.И. Европейский байбак: экология, сохранение и использование // Пособие для специалистов по природопользованию. Киров. — 1997. — 156 с.
2. Орлова, Е.А. Особенности разведения растительноядных пушных зверей: Курс лекций / Е.А. Орлова, О.И. Федорова. — Москва: ООО «Академия Принт», 2025. — 128 с. — ISBN 978-5-605-33689-1. — EDN ZFSPZO.
3. Технология разведения степного сурка (Marmota Bobak) в условиях клеточного содержания / Е.А. Тинаева, Г.А. Федосеева, Н.А. Балакирев [и др.]. — Москва: Научно-исследовательский институт пушного звероводства и кролиководства им. В.А. Афанасьева, 2009. — 46 с. — EDN UCBACT.
4. Федорова, О.И. Первые этапы промышленной доместикации степного сурка (Marmota bobak Muller, 1776) / О.И. Федорова // Вавиловский журнал генетики и селекции. — 2011. — Т. 15, № 4. — С. 697–704. — EDN OOZBQJ.
5. Федорова, О.И. Влияние доместикации на хозяйственно полезные и морфофизиологические признаки норки американской (Mustela vison Schreber, 1777), хорька (Mustela putorius L., 1758) и сурка степного (Marmota bobak Mull., 1776) при промышленной технологии разведения : специальность 06.02.07 «Разведение, селекция и генетика сельскохозяйственных животных» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук / Федорова Оксана Ивановна. — Москва, 2014. — 46 с. — EDN ZPHBLF.
6. Федорова, О.И. Использование биологических особенностей сурков при включении их в зоокультуру / О.И. Федорова, Ю.А. Калугин, Н.А. Балакирев // Ветеринария, зоотехния и биотехнология. — 2017. — № 6. — С. 69–74. — EDN ZAOPSR.

© Федорова Оксана Ивановна (ox_fed@mail.ru); Орлова Елена Александровна; Ларина Елена Евгеньевна

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.32

СХОДСТВО ФЕНОТИПИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ BURKHOLDERIA PSEUDOMALLEI В ОТВЕТ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ГИПОКСИИ И ЦЕФТАЗИДИМА

SIMILARITY OF PHENOTYPIC RESPONSES OF BURKHOLDERIA PSEUDOMALLEI TO HYPOXIA AND CEFTAZIDIME EXPOSURE

P. Chirskov
Bui Thi Lan An
I. Zakharova

Summary. The study investigates the effect of oxygen deficiency (hypoxia) and ceftazidime exposure (at concentrations of 25 and 50 μg/mL) on the ability of *Burkholderia pseudomallei* to form biofilms. The research was conducted on four strains of different sequence types (ST46, ST15, ST1566, ST315) using scanning electron microscopy (SEM). It was found that both stress factors stimulate biofilm formation. Under hypoxic conditions, all studied strains acquired resistance to ceftazidime (growth inhibition zone: 0 mm). The obtained data are important for understanding the mechanisms of pathogen adaptation and developing effective treatment regimens for melioidosis.

Keywords: Burkholderia pseudomallei, biofilm, melioidosis, ceftazidime, hypoxia, filamentation, resistance.

Чирсков Павел Романович
н.с., ФКУЗ Волгоградский научно-исследовательский противочумный институт Роспотребнадзора
chirscov@gmail.com
Буй Тхи Лан Ань
кандидат биологических наук, н.с., Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр, г. Ханой, Вьетнам
Захарова Ирина Борисовна
Доктор биологических наук, доцент, в.н.с., ФКУЗ Волгоградский научно-исследовательский противочумный институт Роспотребнадзора
zib279@gmail.com

Аннотация. В работе изучено влияние недостатка кислорода и воздействия цефтазидима (в концентрациях 25 и 50 мкг/мл) на способность *Burkholderia pseudomallei* формировать биопленки. Исследование проведено на четырех штаммах различных сиквенс типов (ST46, ST15, ST1566, ST315) с применением сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Установлено, что оба стрессовых фактора стимулируют формирование биопленки. В условиях недостатка кислорода все исследованные штаммы приобрели резистентность к цефтазидиму (зона задержки роста 0 мм). Полученные данные важны для понимания механизмов адаптации патогена и разработки эффективных схем терапии мелиоидоза.

Ключевые слова: Burkholderia pseudomallei, биопленка, мелиоидоз, цефтазидим, гипоксия, филаментация, резистентность.

Введение

Возбудитель мелиоидоза — *Burkholderia pseudomallei* — оппортунистический патоген, обитающий во влажных почвах тропических и субтропических регионов по всему миру. Естественный ареал этой бактерии охватывает 55 стран и постоянно расширяется. Так, за последние 10 лет список эндемичных по мелиоидозу стран пополнился 12 новыми странами Африки, Азии, Океании и Америки, в том числе США [1].

Подавляющее большинство эндемичных по мелиоидозу стран являются популярными туристическими направлениями. По данным Ассоциации туроператоров России, эндемичные по мелиоидозу Таиланд, Вьетнам и Китай входят в шестерку наиболее посещаемых российскими туристами стран. При этом для этих стран наблюдается устойчивая тенденция роста туристического потока, что повышает риск заноса мелиоидоза в РФ.

К настоящему времени установлено, что *B. pseudomallei* способна адаптироваться к разнообразным неблагоприятным условиям внешней среды, включая нехватку кислорода, осмотический и оксидативный стрессы, а также воздействие антимикробных средств и дезинфектантов. Причем большинство из перечисленных стрессовых факторов являются общими как для сапрофитического существования возбудителя, так и при инфекционном процессе [2–4].

Воздействие стрессовых факторов часто сопровождается модификацией морфологических признаков возбудителя, включая изменение формы и размера клеток, структуры клеточной стенки и формированием биопленки, что в свою очередь, позволяет патогену не только переживать неблагоприятные условия, но и приобретать устойчивость к антимикробным препаратам, используемым при терапии мелиоидоза [5, 6]. Выявление закономерностей таких изменений особенно

актуально в контексте растущей проблемы антибиотикорезистентности.

Цель данной работы — определить морфологические характеристики биопленки *Burkholderia pseudomallei* в условиях гипоксии и под воздействием цефтазидима.

Материалы и методы

Для исследования использовали штаммы *B. pseudomallei* четырех сиквенс типов (ST46, ST15, ST1566, ST315). Штаммы культивировали при доступе кислорода в L-агаре при 37°C в течение 36 часов. Для моделирования условий недостатка кислорода бактериальную взвесь 36-часовых культур плотностью 0,5–0,63 по McFarland, приготовленную на физиологическом растворе, смешивали с L-бульоном в соотношении 1:1, доступ кислорода блокировали физическим путем — под слоем парафильма. Инкубацию проводили при температуре 37°C в течение 14 суток. В качестве контроля использовали те же штаммы *B. pseudomallei*, культивированные в идентичных условиях, но при нормальной аэрации (без слоя парафильма) в течение тех же 14 суток.

Антибиотикочувствительность штаммов определяли диско-диффузионным методом на агаре Мюллера-Хинтон в соответствии с рекомендациями CLSI [7].

Для оценки способности образовывать биопленку по завершении 14-суточной инкубации бактериальные культуры высевали на агар Мюллера-Хинтона. Для каждого штамма формировали четыре экспериментальные группы: нормальные условия (культура после инкубации при нормальной аэрации высевалась на агар Мюллера-Хинтон без антибиотика), воздействие цефтазидима в субингибирующей концентрации 25 мкг/мл (культура после инкубации при нормальной аэрации высевалась на агар Мюллера-Хинтон с добавлением антибиотика в указанной концентрации), воздействие цефтазидима в ингибирующей концентрации 50 мкг/мл (аналогично — на среде с соответствующей концентрацией цефтазидима) и воздействие гипоксии (осадок бульонной культуры, выращенной в условиях недостатка кислорода).

Сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) проводили с помощью электронного микроскопа NeoScope JCM-700 («Jeol», Япония) в режиме высокого вакуума, с ускоряющим напряжением 15kV, с детекцией вторично-отраженных электронов, с контрастированием платиной с помощью вакуумного устройства для напыления JEOL SMART COATER.

Все исследования проводились в соответствии с требованиями биобезопасности, регламентированными СанПиН 3.3686-21 «Санитарно-эпидемиологические требования по профилактике инфекционных болезней».

Результаты и обсуждение

Чувствительность штаммов *B. pseudomallei* (ST46, ST15, ST1566, ST315) к цефтазидиму до и после воздействия гипоксии оценивали диско-диффузионным методом. До воздействия гипоксии все штаммы были чувствительны к цефтазидиму. После 14 суток воздействия недостатка кислорода все исследованные штаммы приобрели устойчивость к цефтазидиму. Необходимо отметить, что после двухкратных пересевов устойчивых штаммов и инкубации в условиях нормальной аэрации в течение 14 суток у всех штаммов произошла реверсия к исходному чувствительному к цефтазидиму фенотипу (Таблица 1). То есть, наблюдаемая после воздействия гипоксии устойчивость к цефтазидиму является ненаследуемой толерантностью.

Таблица 1.

Чувствительность *B. pseudomallei* к цефтазидиму до и после воздействия гипоксии

Штамм *B. pseudomallei*	Зона задержки роста (мм)		
	Исходная	После гипоксии	Возврат к нормальной аэрации
ST46	29 мм (S)	0 мм (R)	28 мм (S)
ST1566	30 мм (S)	0 мм (R)	31 мм (S)
ST15	22 мм (S)	0 мм (R)	25 мм (S)
ST315	22 мм (S)	0 мм (R)	25 мм (S)

Примечание:
Содержание цефтазидима в диске — 30 мкг.
Критерии оценки чувствительности к цефтазидиму:
R (резистентность) — зона задержки роста ≤ 14 мм;
I (промежуточная чувствительность) — зона задержки роста 15–17 мм;
S (чувствительность) — зона задержки роста ≥ 18 мм [7].

Анализ морфологических характеристик показал, что при выращивании в условиях в нормальной аэрации без добавления антибиотика бактериальные клетки всех исследованных штаммов имели типичную форму бацилл, располагаясь преимущественно одиночно или в виде коротких цепочек. При добавлении в среду культивирования цефтазидима в концентрации 25 мкг/мл у всех штаммов наблюдали филаментацию и образование биопленки в виде плотного монослоя бактериальных клеток. При добавлении в среду культивирования цефтазидима в концентрации 50 мкг/мл все исследованные штаммы формировали многослойную биопленку с обильным межклеточным матриксом. У штамма ST46 биопленка имела более выраженную структурированность.

У всех исследованных штаммов под воздействием гипоксии присутствовала многослойная плотная биопленка, состоящая из полиморфных клеток (бациллы

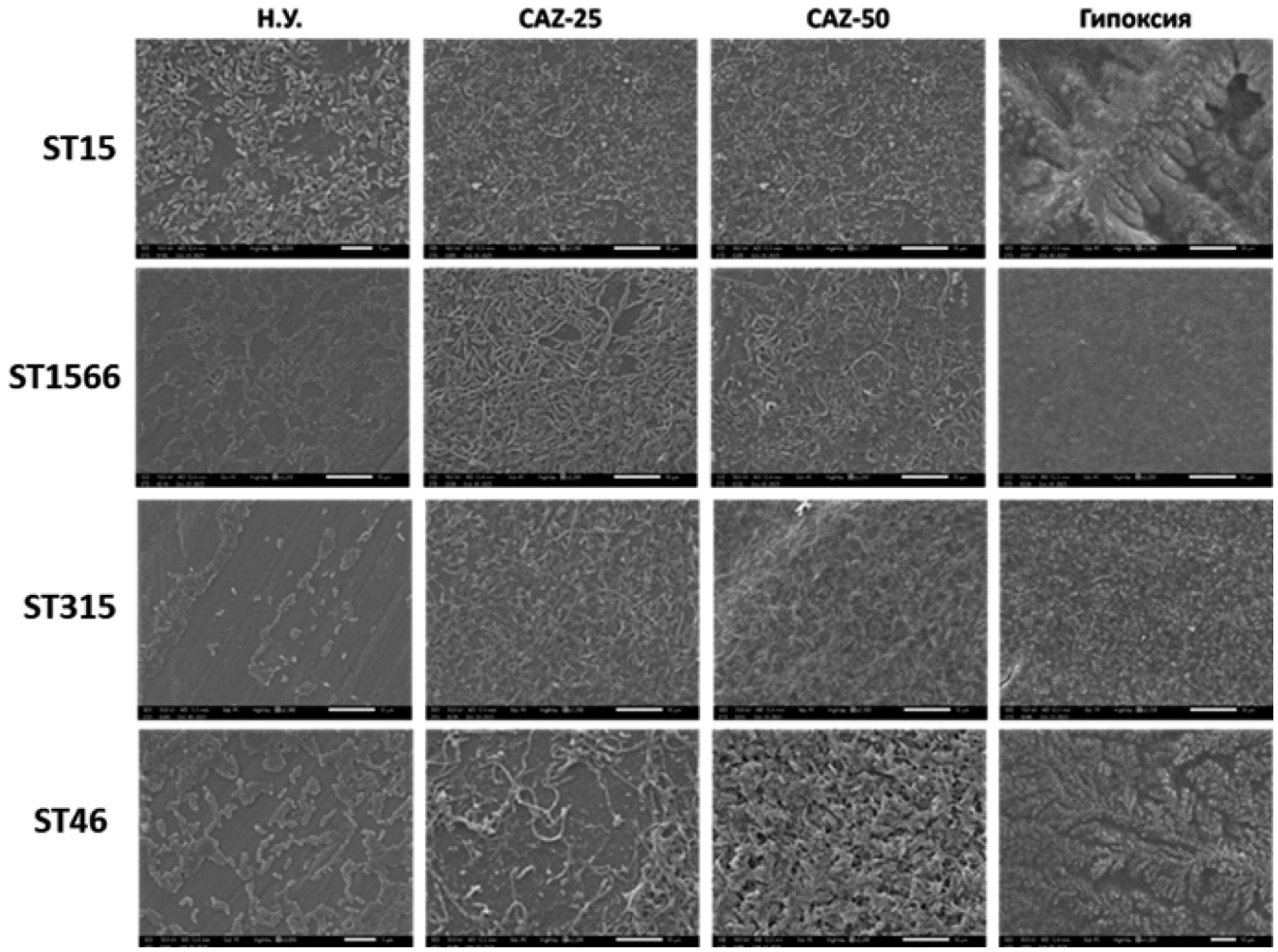


Рис. 1. Биопленки штаммов *B. pseudomallei* под воздействием цефтазидима и при гипоксии (СЭМ, увеличение х 2200–3000)

и коккобациллы), погруженных в обильный межклеточный матрикс. У штаммов *B. pseudomallei* ST15 и ST46 наблюдали образование выраженных объемных кластеров. У штаммов *B. pseudomallei* ST1566 и ST315 биопленка имела «гладкую» структуру.

Структурные особенности биопленок штаммов *B. pseudomallei* различных сиквенс-типов (ST46, ST15, ST1566, ST315) в нормальных условиях, при гипоксии, а также под воздействием цефтазидима (CAZ) в концентрациях 25 мкг/мл и 50 мкг/мл (CAZ-25 и CAZ-50) представлены на рисунке 1.

Полученные данные показывают, что воздействие как гипоксии, так и цефтазидима стимулируют формирование биопленки, что свидетельствует о вероятно едином механизме адаптации возбудителя мелиоидоза к обоим видам стресса.

Заключение

Показано, что как воздействие цефтазидима, так и гипоксии стимулируют у возбудителя мелиоидоза формирование биопленки. Субъингибирующие концентрации цефтазидима индуцируют филаментацию клеток *B. pseudomallei* и образование монослойной биопленки. Более высокие концентрации цефтазидима, как и гипоксия, приводят к формированию многослойных биопленок с обильным межклеточным матриксом, при этом обнаружены межштаммовые различия в структуре биопленок. Полученные данные свидетельствуют, что недостаток кислорода и воздействие цефтазидима запускают перестройку бактериального сообщества по единому адаптационному сценарию, морфологически выраженному в образовании биопленки. Молекулярные механизмы адаптации возбудителя мелиоидоза к данным стрессовым факторам являются предметом наших дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nyanasegran P.K. Biofilm Signaling, Composition and Regulation in *Burkholderia pseudomallei* / P.K. Nyanasegran, S. Nathan, M. Firdaus-Raih et al. // Journal of Microbiology and Biotechnology. — 2023. — Vol. 33, № 1. — P. 15–27. — doi: 10.4014/jmb.2208.08038.
2. Pumpuang A. Survival of *Burkholderia pseudomallei* in distilled water for 16 years / A. Pumpuang, N. Chantratita, C. Wikraiphat et al. // Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene. — 2011. — Vol. 105, № 10. — P. 598–600. — doi: 10.1016/j.trstmh.2011.05.008.
3. Pumirat P. Effects of sodium chloride on heat resistance, oxidative susceptibility, motility, biofilm and plaque formation of *Burkholderia pseudomallei* / P. Pumirat, M. Vanaporn, U. Boonyuen et al. // MicrobiologyOpen. — 2017. — Vol. 6, № 4. — Art. e00493. — doi: 10.1002/mbo3.493.
4. Лучинин Д.Н. Анализ резистентности у *Burkholderia pseudomallei* к бензалкония хлориду и антибиотикам / Д.Н. Лучинин, Е.В. Молчанова, И.Б. Захарова, Д.В. Викторов // Проблемы особо опасных инфекций. — 2022. — № 3. — С. 115–119. — doi: 10.21055/0370-1064-2022-3-115-119.
5. Chen K. Modified Virulence of Antibiotic-Induced *Burkholderia pseudomallei* Filaments / K. Chen, G.W. Sun, K.L. Chua, Y.H. Gan // Antimicrobial Agents and Chemotherapy. — 2005. — Vol. 49, № 3. — P. 1002–1009. — doi: 10.1128/AAC.49.3.1002-1009.2005.
6. Kester J.C. Persisters and beyond: mechanisms of phenotypic drug resistance and drug tolerance in bacteria / J.C. Kester, S.M. Fortune // Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology. — 2014. — Vol. 49, № 2. — P. 91–101. — doi: 10.1080/10409238.2014.894954.
7. CLSI. Methods for Antimicrobial Dilution and Disk Susceptibility Testing of Isolated or Fastidious Bacteria: CLSI Guideline M45 / 3rd ed. — Wayne, PA: Clinical and Laboratory Standards Institute, 2016. — P. 60–64.

© Чирсков Павел Романович (chirscov@gmail.com); Буй Тхи Лан Ань;
Захарова Ирина Борисовна (zib279@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.01

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ И МОДУЛЯ ГЕЙМИФИКАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ ФИНАНСОВОЙ ГРАМОТНОСТИ ДЛЯ МЛАДШИХ ШКОЛЬНИКОВ

DESIGNING THE ARCHITECTURE AND GAMIFICATION MODULE OF AN EDUCATIONAL PLATFORM FOR ELEMENTARY SCHOOL STUDENTS' FINANCIAL LITERACY

A. Abadzhyan

Summary. *Objective*: Design architecture and gamification module for financial literacy platform (ages 7–10) using React.js + Phaser.js + Node.js + PostgreSQL stack. *Methods*: IDEF0 functional modeling, ER-modeling with 3NF normalization, pedagogical modeling based on self-determination theory. *Results*: Three-tier client-server architecture with five functional modules. Database schema of 12 tables using JSONB for variable structures and ACID transactions for virtual currency. Adaptive difficulty algorithm based on moving average and achievement system with 18 types and progressive unlocking. *Significance*: Technical documentation ready for prototype implementation, compliant with Russian Federation regulations and ensuring 60 FPS performance at 15 MB application size.

Keywords: gamification module, educational platform, PostgreSQL, adaptive algorithms, financial literacy.

Абаджян Анастасия Александровна
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации,
nastya.abadzhyan@yandex.ru

Аннотация. *Цель*: Проектирование архитектуры и модуля геймификации образовательной платформы по финансовой грамотности для детей 7–10 лет на основе стека React.js + Phaser.js + Node.js + PostgreSQL. *Методы*: Функциональное моделирование в нотации IDEF0, ER-моделирование с нормализацией до 3НФ, педагогическое моделирование на основе теории самодетерминации. *Результаты*: Разработана трёхуровневая клиент-серверная архитектура с пятью функциональными модулями. Спроектирована схема БД из 12 таблиц с использованием типа JSONB для вариативных структур и поддержкой ACID-транзакций для виртуальной валюты. Реализован алгоритм адаптивной сложности на основе скользящего среднего и система из 18 типов достижений с прогрессивной разблокировкой. *Практическая значимость*: Подготовлена техническая документация для реализации прототипа, соответствующего требованиям 152-ФЗ, 436-ФЗ, ГОСТ Р 52872-2019 и обеспечивающего производительность 60 FPS при размере приложения 15 МБ.

Ключевые слова: модуль геймификации, образовательная платформа, PostgreSQL, адаптивные алгоритмы, финансовая грамотность.

Введение

В работе [1] обоснован выбор технологического стека React.js + Phaser.js + Node.js + PostgreSQL для образовательной платформы финансовой грамотности. Выбранный стек набрал максимальный рейтинг 18 баллов по методу многокритериального ранжирования, продемонстрировав размер приложения 15 МБ, время загрузки 2,4 секунды и потенциальное снижение стоимости разработки на 35 % по сравнению с альтернативными решениями [1].

Архитектурные решения, принятые на этапе проектирования, оказывают долгосрочное влияние на масштабируемость, сопровождаемость и стоимость эксплуатации системы [3, 4]. Теория самодетерминации Э. Деси и Р. Райана [13] выделяет три базовые психологические потребности — автономия, компетентность и связанность, удовлетворение которых определяет эффективность геймификации. Концепция потока М. Чиксентмихайи [14] обосновывает необходимость адаптивной сложности для поддержания оптимального баланса между вызовом и уровнем навыков. Исследование И.Н. Глазуновой [5] показало, что интеграция игровых механик в образовательный процесс начальной школы повышает учебную мотивацию на 7,6 балла и академическую успеваемость с 4,2 до 4,5 балла.

Цель работы — проектирование архитектуры и модуля геймификации образовательной платформы с учётом возрастных особенностей младших школьников и нормативных требований Российской Федерации.

Методы исследования

Функциональное моделирование в нотации IDEF0 использовалось для декомпозиции системы на функциональные блоки с определением входов, выходов, механизмов и управляющих воздействий. Нотация обеспечивает формализованное описание бизнес-процессов и выявление взаимосвязей между подсистемами [4].

Проектирование реляционной базы данных выполнялось методом нормализации до третьей нормальной формы. Первая нормальная форма устраняет повторяющиеся группы данных, вторая — частичные зависимости от составного ключа, третья — транзитивные зависимости. Нормализация критична для образовательной платформы, работающей с данными о прогрессе обучения и виртуальными финансовыми операциями, поскольку устраняет аномалии вставки, обновления и удаления.

Проектирование модуля геймификации основывалось на педагогическом моделировании с учётом теории самодетерминации [13], концепции потока [14] и теории оперантного обусловливания [15]. Система игровых механик разрабатывалась через декомпозицию мотивационных потребностей целевой аудитории на конкретные игровые элементы с количественными параметрами.

Оценка проектных решений проводилась методом экспертного анализа соответствия разработанной архитектуры функциональным требованиям и нормативным актам РФ: Федеральному закону № 152-ФЗ [12], Федеральному закону № 436-ФЗ и ГОСТ Р 52872-2019.

Функциональные требования и архитектура системы

На основе функционального моделирования в нотации IDEF0 выделены пять основных процессов: управление пользователями (A1), управление контентом (A2), оценивание (A3), геймификация (A4), аналитика (A5). Декомпозиция уровня A0 детализировала подпроцессы для четырёх ролей: обучающийся (7–10 лет), родитель, педагог, администратор [4].

Функциональные требования включают регистрацию и аутентификацию с разделением ролей через JWT-токены и bcrypt-хэширование, доступ к интерактивным урокам с управлением контентом в формате JSONB, немедленную обратную связь менее 200 мс и систему оценивания, сбор аналитики прогресса с адаптацией сложности, полную геймификацию с нарративной оболочкой «ФинГород», виртуальной валютой «ФинКоины» и достижениями.

Нефункциональные требования определяют производительность 60 fps на устройствах среднего сегмента благодаря Phaser.js, безопасность через соответствие 152-ФЗ и шифрование AES-256, доступность по ГОСТ Р 52872-2019 и размер приложения менее 20 МБ [2].

Трёхуровневая клиент-серверная архитектура включает клиентский уровень на React.js + Phaser.js, где React отвечает за интерфейсы, а Phaser.js интегрируется в компоненты для отрисовки игровых сцен. Серверный уровень на Node.js + NestJS обеспечивает REST API для основных операций и WebSocket для взаимодействия в реальном времени. Уровень данных на PostgreSQL обеспечивает хранение с поддержкой ACID-транзакций для операций с виртуальной валютой.

Таблица 1.

Функциональная декомпозиция модулей платформы

Код	Модуль	Основные функции	Технология
A1	Управление пользователями	Регистрация, аутентификация, RBAC, согласие родителей	NestJS, JWT, bcrypt
A2	Управление контентом	CRUD уроков, версионирование, структурирование по темам	NestJS, PostgreSQL JSONB
A3	Оценивание	Проверка ответов, фиксация результатов, формирование отчётов	NestJS, PostgreSQL
A4	Геймификация	Виртуальная валюта, достижения, рейтинги, адаптивная сложность	NestJS, Phaser.js, Socket.io
A5	Аналитика	Сбор метрик, визуализация прогресса, дашборды педагогов	NestJS, React.js (Recharts)

Модульная архитектура обеспечивает слабую связанность: каждый модуль взаимодействует через API-контракты, что позволяет модифицировать, тестировать и масштабировать модули независимо. Модуль геймификации (A4) потребляет данные модулей оценивания (A3) и контента (A2), инициируя начисление виртуальной валюты и проверку условий достижений. Модуль аналитики (A5) агрегирует данные всех модулей для формирования комплексной картины образовательного процесса.

Проектирование базы данных

Реляционная база данных спроектирована в третьей нормальной форме и состоит из 12 таблиц: users (учётные записи с полем parent_id для иерархической связи «ребёнок–родитель»), profiles (профили детей, связанные с родительскими аккаунтами), content (уроки с полем json_data типа JSONB для хранения структуры переменного формата), tasks (задания внутри уроков), task_results (результаты выполнения), wallets (виртуальные кошельки), fincoins_transactions (история операций с виртуальной валютой), achievements (справочник достижений), user_achievements (прогресс получения), fin_city_progress (состояние игрового мира).

Ключевым проектным решением является использование типа JSONB для полей с переменной структурой. Это позволяет хранить разнородный контент без изме-

нения схемы БД и обеспечивает индексирование для эффективного поиска по структурированным данным [11]. Ссылочная целостность обеспечивается 15 внешними ключами с правилом ON DELETE CASCADE, гарантирующим полное удаление персональных данных при отзыве согласия, соответствуя требованиям 152-ФЗ [4, 12]. Для операций с начислением «ФинКоинов» используется уровень изоляции транзакций SERIALIZABLE, предотвращающий ошибки конкурентного доступа.

Таблица 2.

Структура ключевых таблиц базы данных

Таблица	Поле	Тип данных	Ключ	Описание
users	id	SERIAL	PK	Первичный ключ
	role_id	INTEGER	FK	Ссылка на roles
	parent_id	INTEGER	FK	Ссылка на users (родитель)
	password_ hash	VARCHAR(255)	—	Хэш bcrypt с солью
	consent_ given	BOOLEAN	—	Согласие 152-ФЗ
wallets	id	SERIAL	PK	Первичный ключ
	user_id	INTEGER	FK, UQ	Уникальная ссылка на users
	balance	INTEGER	—	CHECK >= 0, баланс ФинКоинов
fincoins_ transactions	id	SERIAL	PK	Первичный ключ
	wallet_id	INTEGER	FK	Ссылка на wallets
	amount	INTEGER	—	CHECK > 0, сумма транзакции
	source	ENUM	—	Источник/ назначение
achievements	id	SERIAL	PK	Первичный ключ
	config	JSONB	—	Условия получения
task_results	id	SERIAL	PK	Первичный ключ
	user_id	INTEGER	FK	Ссылка на users
	task_id	INTEGER	FK	Ссылка на tasks
	score	DECIMAL(5,2)	—	Оценка 0–100

Персональные данные защищены на двух уровнях: при передаче через шифрование протоколом TLS 1.2+ на уровне HTTPS-соединения, в покое через шифрование чувствительных данных алгоритмом AES-256 на уровне приложения. Пароли хранятся как хэши bcrypt с коэффициентом стоимости 12, обеспечивающим время вычисления около 250 миллисекунд.

Проектирование модуля геймификации

Модуль построен на нарративной оболочке «ФинГород» — виртуальном городе, разделённом на шесть тематических районов, соответствующих категориям финансовой грамотности ФГОС НОО: Монетный двор (деньги и их функции), Торговая площадь (покупки и цены), Жилой квартал (бюджет семьи), Деловой центр (доходы и расходы), Сберегательный парк (сбережения), Банковский проспект (банковские услуги). Обучающийся последовательно открывает районы по мере освоения тематических блоков. Каждый район содержит NPC-персонажей, предлагающих задания контекстно [8, 9].

Система виртуальной валюты «ФинКоины» выполняет двойную функцию. Как мотивационный инструмент обеспечивает положительное подкрепление по теории оперантного обусловливания Б.Ф. Скиннера [15]: каждое успешное действие вознаграждается начислением валюты. Как обучающий элемент моделирует реальные финансовые операции: получение «дохода» за выполнение заданий, «расходование» на элементы кастомизации, планирование «бюджета» для приобретения желаемых предметов.

Источники начисления дифференцированы: выполнение задания (10–50 ФК в зависимости от сложности), получение достижения (25–200 ФК), ежедневный бонус (5 ФК), серия из 7 дней (50 ФК), помощь другим обучающимся (15 ФК). Применяется режим подкрепления с переменным соотношением: с вероятностью 15 % вознаграждение удваивается («золотой бонус») [15]. Расходование осуществляется в виртуальном магазине с ценовой калибровкой: простые элементы (50–100 ФК) доступны после 2–3 уроков, средние (200–500 ФК) — после тематического блока, эксклюзивные (1000+ ФК) — требуют накопления в течение нескольких недель.

Система достижений реализует потребность в компетентности по теории самодетерминации [13]. Разработано 18 типов достижений в трёх категориях. Учебные достижения фиксируют прогресс освоения программы: «Первые шаги» (25 ФК), «Знаток монет» (50 ФК), «Бюджетный мастер» (75 ФК), «Финансовый грамотей» (200 ФК), «Отличник» (100 ФК), «Безошибочный» (75 ФК). Социальные достижения стимулируют взаимодействие: «Помощник» (30 ФК), «Наставник» (100 ФК), «Лидер класса» (150 ФК), «Командный игрок» (60 ФК), «Друг ФинГорода» (80 ФК). Специальные достижения поддерживают системность: «Марафонец» (200 ФК), «Исследователь» (70 ФК), «Скорость мысли» (50 ФК), «Коллекционер» (120 ФК), «Финансовый гений» (200 ФК), «Экономист» (150 ФК), «Меценат» (100 ФК).

Таблица 3.
Категории и примеры достижений модуля геймификации

Категория	Достижение	Условие получения	Награда, ФК
Учебные	Первые шаги	Завершение первого урока	25
	Отличник	Средний балл > 90 по всем заданиям	100
	Безошибочный	5 заданий подряд без ошибок	75
Социальные	Помощник	Первая одобренная подсказка	30
	Лидер класса	1-е место в рейтинге за неделю	150
	Друг ФинГорода	Помощь 10 различным NPC	80
Специальные	Марафонец	Вход 30 дней подряд	200
	Экономист	Накопление 5000 ФК без покупок	150
	Финансовый гений	Секретная комбинация действий	200

Прогрессивная система разблокировки обеспечивает постепенное усложнение: достижения первого уровня доступны с регистрации, второго уровня — после получения 3 базовых, третьего уровня — после 5 продвинутых. Структура реализует концепцию потока М. Чиксентмихайи [14]: по мере роста навыков растёт сложность целей, поддерживая баланс вызова и компетентности.

Адаптивный механизм сложности автоматически подстраивает уровень заданий, создавая условия для достижения состояния потока [6, 7, 14]. Механизм использует скользящее среднее результатов последних 10 заданий для определения текущего уровня компетентности. Алгоритм адаптации: если средний балл за последние 10 заданий превышает 85, уровень сложности увеличивается на 1 (максимум 5); если ниже 50 — снижается на 1 (минимум 1); если в диапазоне 50–85 — сохраняется. Изменение происходит не чаще одного раза за учебную сессию (5–10 заданий), предотвращая резкие колебания.

Параметры варьируются по уровням. Уровень 1: три варианта ответа, суммы до 100 рублей, без ограничения времени, подсказки доступны. Уровень 2: четыре варианта, суммы до 500 рублей, 120 секунд, одна подсказка. Уровень 3: четыре варианта с близкими дистракторами, суммы до 1000 рублей, 90 секунд, подсказки недоступны. Уровень 4: многошаговые задачи, суммы до 5000 рублей, 60 секунд. Уровень 5: комплексные задачи с несколькими факторами, суммы без ограничений, 45 секунд. Вознаграждение масштабируется: базовое вознаграждение умножается на коэффициент уровня (1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.5).

Немедленная обратная связь обеспечивается через комбинацию визуальных и звуковых эффектов Phaser.js. Правильный ответ сопровождается анимацией начисления ФинКоинов, зелёной подсветкой и звуковым сигналом за менее 200 миллисекунд. Неправильный ответ — мягкой красной подсветкой и объяснением от имени NPC-персонажа. Время отклика менее 200 мс критично для младших школьников [10].

Визуализация прогресса реализована на трёх уровнях: микроуровень (прогресс-бар текущего урока, счётчик баллов и ФинКоинов), мезоуровень (карта ФинГорода с отображением открытых районов, индикаторы прогресса по тематическим блокам), макроуровень (профиль с общей статистикой, коллекцией достижений, балансом ФинКоинов, позицией в рейтинге класса). Рейтинговая система обновляется в реальном времени через WebSocket, создавая элемент соревнования. Антидемотивационные меры: еженедельное обновление, отображение первых 10 позиций, акцент на личных достижениях.

Интеграция и оценка проектных решений

Геймификация интегрирована с другими модулями через WebSocket (Socket.io), обеспечивая время отклика менее 200 мс [2, 10]. Модуль «Управление контентом» (A2) поставляет данные об уроках и заданиях. Модуль «Оценивание» (A3) передаёт результаты для расчёта наград и инициирует проверку условий достижений. Модуль «Геймификация» (A4) передаёт данные о валютных операциях и достижениях в модуль «Аналитика» (A5), который агрегирует данные для отчётов родителям и педагогам.

Таблица 4.
Оценка соответствия проектных решений требованиям

Требование	Проектное решение	Статус
Хранение данных на территории РФ (152-ФЗ, ст. 18)	PostgreSQL на российских серверах	Соответствует
Согласие родителей (152-ФЗ)	Поле consent_given, механизм отзыва	Соответствует
Каскадное удаление данных	15 FK с ON DELETE CASCADE	Соответствует
Маркировка 6+ (436-ФЗ)	Контент-политика, модерация	Соответствует

Требование	Проектное решение	Статус
Доступность (ГОСТ Р 52872-2019)	ARIA-атрибуты, контрастность 4,5:1	Соответствует
Производительность 60 fps	Phaser.js с WebGL/Canvas	Соответствует
Размер приложения < 20 МБ	React.js + Phaser.js: 15 МБ	Соответствует
Время загрузки < 3 сек	Code Splitting, Lazy Loading: 2,4 сек	Соответствует
Потребность в автономии (Деси, Райан)	Выбор районов, траекторий, кастомизация	Реализовано
Потребность в компетентности	Система достижений (18 типов), прогресс-бары	Реализовано
Потребность в связанности	Рейтинг класса, социальные достижения	Реализовано
Состояние потока (Чиксентмихайи)	Адаптивная сложность (5 уровней)	Реализовано
Подкрепление (Скиннер)	ФинКоины, переменное подкрепление (15 %)	Реализовано
ACID-транзакции для финансовых операций	PostgreSQL, уровень SERIALIZABLE	Соответствует

Экспертный анализ подтвердил полное соответствие проектных решений нормативным требованиям РФ (152-ФЗ, 436-ФЗ, ГОСТ Р 52872-2019) и педагогическим теориям мотивации. Количественная оценка БД: 12 таблиц в 3НФ, 15 внешних ключей, 20 индексов, расчётный объём ~2,5 ГБ для 10000 пользователей за учебный год. Сравнение с аналогами показывает преимущество по производительности за счёт Phaser.js [2] и гибкости благодаря гибридной схеме SQL+NoSQL (PostgreSQL JSONB) [11].

Заключение

Решена задача проектирования архитектуры и модуля геймификации образовательной платформы финансовой грамотности для младших школьников. Разработана трёхуровневая клиент-серверная архитектура с пятью функциональными модулями, декомпозированными в нотации IDEF0. Спроектирована реляционная база данных из 12 таблиц в 3НФ с использованием JSONB для структур переменного формата, обеспечением ссылочной целостности через 15 внешних ключей с ON DELETE CASCADE, применением уровня изоляции SERIALIZABLE для транзакций с виртуальной валютой, шифрованием чувствительных данных алгоритмом AES-256.

Разработан модуль геймификации, включающий нарративную оболочку «ФинГород» с шестью тематическими районами, систему виртуальной валюты «ФинКоины» с дифференцированными источниками начисления и виртуальным магазином, систему из 18 типов достижений с прогрессивной разблокировкой, адаптивный механизм сложности с 5 уровнями на основе скользящего среднего, систему немедленной обратной связи с временем отклика менее 200 мс, рейтинговую систему с антидемотивационными мерами. Игровые механики теоретически обоснованы: теория самодетерминации [13] обосновывает систему достижений и выбора траекторий, концепция потока [14] — адаптивную сложность, теория оперантного обусловливания [15] — систему вознаграждений с переменным подкреплением.

Экспертный анализ подтвердил соответствие проектных решений нормативным требованиям РФ (152-ФЗ, 436-ФЗ, ГОСТ Р 52872-2019), педагогическим теориям мотивации и техническим требованиям по производительности и безопасности. Практическая значимость — создание проектной документации, готовой к реализации прототипа. Научная новизна — интеграция педагогически обоснованных игровых механик в архитектуру образовательной платформы с учётом когнитивных особенностей детей 7–10 лет, требований информационной безопасности и использованием адаптивных элементов для персонализации траекторий обучения финансовой грамотности.

Направления дальнейших исследований: разработка функционального прототипа на базе спроектированной архитектуры, проведение нагрузочного тестирования для валидации параметров производительности, оценка педагогической эффективности геймификационных механик в условиях пилотного внедрения, исследование долгосрочного влияния платформы на формирование финансовой грамотности младших школьников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обоснование выбора технологического стека для модуля геймификации образовательной платформы финансовой грамотности младших школьников // 2026.
2. Мелихова К.А., Томилин Е.С. Сравнительный анализ производительности фреймворков React, Next и Astro // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2024. Т. 9. № 7(45). С. 15–21.
3. Фаулер М. Шаблоны корпоративных приложений. М.: Вильямс, 2016. 544 с.
4. Фиофанова О.А. Стандарты цифровой образовательной среды и архитектура данных в образовании // Вопросы образования. 2022. № 1. С. 104–126.

5. Глазунова И.Н. Использование геймификации при организации образовательного процесса в начальной школе // Управление образованием: теория и практика. 2024. Т. 14. № 1-2. С. 185–192.
6. Федорчук Ю.М. Стратегическое направление цифровой трансформации образовательного процесса — внедрение адаптивных образовательных игр // Образовательные системы и технологии. 2025. № 2 (83). С. 129–141.
7. Койшина Е.А., Попова Т.А. Перспективы геймификации: анализ восприятия образа игры обучающимися // Мир науки. Социология, филология, культурология. 2023. Т. 14. № 4.
8. Абдусаттарова, Д. Из класса на игровую площадку: финансовое образование через интерактивные игры / Д. Абдусаттарова // Передовая экономика и педагогические технологии. — 2025. — № 1 — С. 16–23
9. Шинкарёва О.В., Орлова А.О. Онлайн-квест как метод инновационного обучения школьников основам финансовой грамотности // Экономика и управление: проблемы, решения. 2022. Т. 33. № 3.
10. Авакимян Н.Н., Гучинский Н.С. Разработка образовательной платформы // Научный журнал КубГАУ. 2025. № 210(06).
11. Авакимян Н.Н., Куцевалов Д.С. Разработка веб-приложения для визуализации и трекинга навыков: архитектура Next.js + NestJS + PostgreSQL // Политематический сетевой электронный научный журнал КубГАУ. 2025. № 212(08).
12. О персональных данных: Федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ.
13. Гордеева Т.О. Психология мотивации достижения. М.: Смысл, 2015. 262 с.
14. Чиксентмихайи М. Поток: Психология оптимального переживания. М.: Альпина Нон-фикшн, 2017. 461 с.
15. Скиннер Б.Ф. Наука и человеческое поведение. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2017. 517 с.

© Абаджян Анастасия Александровна (nastya.abadzhyan@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.02

МЕТОДИКА ПОЭТАПНОЙ ВЕРИФИКАЦИИ И ПРОМЫШЛЕННОГО ВНЕДРЕНИЯ ДВУХШКАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРЕДИКТИВНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ АГРЕГАТА БЕССЛИТКОВОЙ ПРОКАТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

METHODOLOGY FOR THE STAGED VERIFICATION AND INDUSTRIAL IMPLEMENTATION OF A DUAL-RATE MODEL FOR PREDICTIVE AUTOMATED CONTROL OF AN ALUMINUM-ALLOY TWIN-ROLL CASTING AND ROLLING UNIT

V. Bazhin
Tran Duc Hieu
L. Nikitina

Summary. The paper considers a methodology for the practical implementation of predictive control in an automated process control system for the twin-roll strip casting and rolling of aluminum alloys. A staged approach is proposed for the melting, casting, and rolling processes. This approach includes model-based predictive control design, as well as hardware-in-the-loop simulation on an industrial computer with selected control modes, followed by integration of the controller into the closed loop while preserving backup controller settings. The methodology is based on the concept of a two-model (two-scale) predictive system, in which the real-time model is used to account for disturbances and the current process state, whereas the fast model is used to compute the optimal control mode over the prediction horizon. It was found that, with a calculated sampling interval of 0.3–0.5 s and a standard industrial controller, it is possible to generate a real-time prediction over 10–15 steps.

Keywords: aluminum alloy, twin-roll casting and rolling, strip billet, automated process control system (APCS), predictive control.

Бажин Владимир Юрьевич
д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
bazhin-alfoil@mail.ru
Чан Дык Хиеу
аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
hieumd1998@mail.ru
Никитина Любовь Николаевна
к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
nikitina_ln@spmi.ru

Аннотация. Рассматривается методика практического внедрения предиктивного управления в автоматизированную систему управления технологическим процессом бесслитковой прокатки алюминиевых сплавов. Предложен поэтапный подход для процессов плавления, литья и прокатки, включающий моделирование на основе модели предиктивного управления, а также аппаратную имитацию на промышленном вычислителе с выбранными режимами управления с последующим включением регулятора в замкнутый контур с сохранением резервных установок регуляторов. Методика основана на концепции двухмодельной (двухшкальной) предиктивной системы, в которой модель реального времени предназначена для учета возмущений и текущего состояния процесса, а быстрая модель — для вычисления оптимального режима управления в горизонте прогноза. Определено, что при расчетной длительности интервала 0,3–0,5 с при использовании стандартного промышленного контроллера возможно формирование прогноза на 10–15 шагов в режиме реального времени, что делает подход применимым для промышленной эксплуатации агрегата бесслитковой прокатки.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, бесслитковая прокатка, листовая заготовка, автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП), предиктивное управление.

Введение

Процесс бесслитковой прокатки (совмещенного литья и прокатки) представляет собой непрерывное получение листовой заготовки непосредственно из расплава в зазоре валков-кристаллизаторов [1, 2]. Технологическая линия, как правило, включает плавильную печь, емкости хранения/миксер, узел фильтрации и литниково-распределительную систему, обеспечивающую равномерную подачу расплава по ширине рабочей зоны. После доведения сплава до заданной температуры расплав через смесительное сопло поступает в проточную емкость, фильтруется и распределяется перед валками; при контакте с поверхностью кристаллизатора происходит интенсивный теплоотвод, формирование твердой корки и одновременная горячая деформация полосы в зазоре вращающихся валков [3]. Вследствие совмещения стадий кристаллизации, охлаждения и прокатки исключаются промежуточные операции разливки в слиток, гомогенизации и повторного нагрева, что сокраща-

ет длительность производственного цикла и удельные энергетические затраты [4]. Вместе с тем качество заготовки в значительной степени определяется согласованностью тепловых и кинематических режимов (перегрев расплава, интенсивность охлаждения, скорость валков, зазор и давление прокатки), поскольку в зоне двухфазного состояния реализуются характерные механизмы вытеснения жидкой фазы и перераспределения деформации по толщине, влияющие на пористость, шероховатость и структурную однородность продукта [5].

Для технологии бесслитковой прокатки (БП) предъявляются повышенные требования к системам управления из-за высокой динамики тепломассообмена в системе «расплав–валки-кристаллизаторы», и ограниченного времени формирования заготовки, сопровождаемая выраженными запаздываниями между изменением управляющих воздействий и температурным режимом процесса [6, 7]. В таких условиях стандартные регуляторы нередко имеют ограниченную эффективность, тогда как предиктивное управление обеспечивает явный учет ограничений, и дает возможность компенсации возмущений на горизонте прогноза [8, 9].

С другой стороны, перенос предиктивного алгоритма из вычислительного эксперимента в реальную АСУ ТП является самостоятельной инженерно-научной задачей [10, 11]. Основные риски связаны с незавершенным состоянием предиктивной модели, неопределенностью теплофизических параметров, запаздыванием расчетов, и особенностями обмена данными на нижнем уровне, а также, дополнительными требованиями промышленной безопасности, исключающими неконтролируемые режимы процесса БП при отказах датчиков или исполнительных механизмов [12]. Под незавершенным состоянием предиктивной модели понимается отсутствие завершенного цикла разработки, включающего: идентификацию/уточнение параметров на целевых режимах; верификацию точности прогноза на выбранном горизонте; подтверждение вычислительной реализуемости на целевой платформе в реальном времени. Поэтому, актуальной является разработка методики внедрения (интеграции), обеспечивающую циклическую проверку данных, воспроизводимость и технологическую безопасность, а также, формализующую критерии приемки и правила переключения режимов. Цель настоящей работы — обосновать и описать поэтапную методику верификации и промышленного внедрения двухмодельного предиктивного управления в состав АСУ ТП агрегата бесслитковой прокатки алюминиевых сплавов.

Методика и принципы интеграции в АСУ

На основе параметрической устойчивости при внедрении предиктивного управления в промышленный контур действующей АСУ ТП целесообразно разделить функции оценки текущего состояния процесса и возмущений от функции «быстрого оптимизационного прогноза» [13]. Под «быстрым оптимизационным прогнозом» понимается многократный расчет прогнозных траекторий на горизонте управления с использованием вычислительно упрощенной модели (М2) и решения оптимизационной задачи с ограничениями по управляющим воздействиям и технологическим параметрам. Концептуально это соответствует двухшкальной предиктивной системе, в которой базовая модель работает в реальном времени и отражает влияние неконтролируемых возмущений параметров процесса, а вспомогательная модель быстрого реагирования предназначена для расчета и корректировки управляющих воздействий. Для контроля и управления процессом бесслитковой прокатки может быть адаптирована модернизированная модель А.А. Перельмана [14] (рисунок 1).

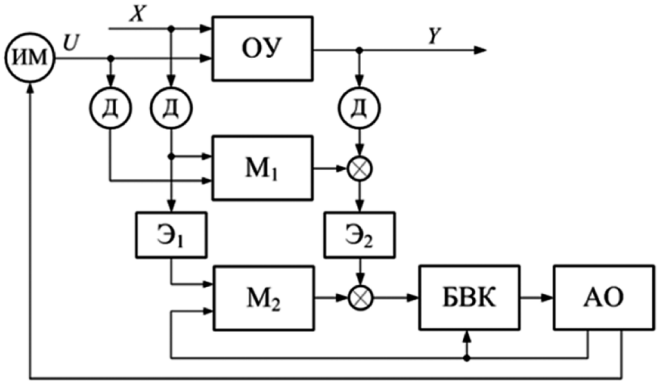


Рис. 1. Структурная двухшкальная предиктивная система А.А. Перельмана

На рисунке 1 приняты следующие обозначения. ОУ — объект управления (процесс бесслитковой прокатки), ИМ — исполнительный механизм, реализующий управляющее воздействие U. Д — Датчик. X — измеряемый промежуточный параметр технологического процесса. Y — выходная величина объекта управления. $М_1$ — модель реального времени. $М_2$ — модель быстрого реагирования. $Э_1$ — экстраполятор. $Э_2$ — блок оценки возмущений/смещения. АО — алгоритм оптимизации. БВК — блок вычисления критерия.

Разделение функций между $М_1$ и $М_2$ позволяет совместить физическую адекватность оценивания текущего состояния процесса и вычислительную эффективность оптимизационного прогноза в реальном времени. Датчик выходной переменной Y дает измерение $y(t)$, модель $М_1$ формирует оценку $y_1(t)$, после чего вычисляется ошибка согласования $e(t)=y(t)-y_1(t)$. На основе этой ошибки в блоке оценки возмущений/смещения $Э_2$ формируется оценка смещения модели или дополнительного неучтенного возмущения $d(t)=F(e(t))$. Далее модель $М_2$ рассчитывает прогноз $y_2(t+k)$, а прогнозируемый выход, используемый в оптимизационной задаче, записывается в виде $y(t+k)=y_2(t+k)+d(t+k)$ ($d(t+k)\approx d(t)$). Экстраполятор

$Э_1$ предназначен для формирования прогноза измеряемых промежуточных параметров технологического процесса на горизонте управления на основе их текущих и предшествующих значений. Полученные оценки используются моделью $М_2$ при расчете прогнозных траекторий объекта и решении задачи оптимизации управления.

Блок вычисления критерия БВК работает в замкнутом цикле «измерение — оценивание — прогноз — оптимизация — управление». На каждом шаге времени в него поступают текущие измерения $y(t)$, промежуточные параметры $X(t)$, оценка возмущения $d(t)$, а также прогноз, полученный с помощью моделей $М_2$ и блока $Э_1$. На этой основе формируется критерий качества управления:

$$J = \sum_{k=1}^{N}\left(y(t+k) - r(t+k)\right)^2 + \lambda\sum_{k=0}^{N-1}\Delta u(t+k)^2 \quad (1)$$

Где t — текущий дискретный момент пересчета управления;

k — индекс шага прогноза;

N — горизонт прогнозирования;

$y(t+k)$ — прогноз выхода объекта,

$r(t+k)$ — требуемая траектория,

$\Delta u(t+k)$ — изменение управляющего воздействия,

λ — весовой коэффициент.

Первая часть характеризует ошибку слежения за заданной траекторией, вторая ограничивает слишком резкие изменения управления. В результате минимизации критерия определяется последовательность управляющих воздействий, из которой в объект подается только первое, после чего на следующем шаге расчет повторяется с учетом новых измерений.

Под моделью предиктивного управления в настоящей работе понимается вычислительный динамический прототип объекта управления, параметризованный по технологическим данным и способный воспроизводить наблюдаемую динамику процесса в диапазоне рабочих режимов [15, 16]. Разработка модели выполнялась не как формальная аппроксимация, а как построение детерминированной физически обоснованной тепловой модели процесса, основанной на законе сохранения энергии. В основу положено нестационарное уравнение теплопроводности в системе «расплав–валки-кристаллизаторы» с учетом фазового перехода, скрытой теплоты кристаллизации и температурной зависимости теплофизических свойств материала. В двухфазной зоне использован подход эффективной теплоемкости, при котором скрытая теплота учитывается через эквивалентную теплоемкость, а изменение теплопереноса — через эффективную теплопроводность. Теплообмен на границах задается граничными условиями конвективного типа с коэффициентами теплоотдачи для контактов «расплав–валок» и «валок–охлаждающая вода». Параметры модели — коэффициенты теплоотдачи, теплофизические свойства материала, характер граничных условий — уточнялись по экспериментально-технологическим данным. Верификация осуществлялась путем сопоставления расчетных температурных полей и температур в характерных точках с измерениями, полученными термопарами, датчиками давления и расходомерами. В рамках настоящей статьи изложены основные принципы построения модели и ее включения в структуру управления, тогда как детальные расчетные соотношения и расширенные результаты идентификации вынесены за рамки изложения.

Практическая реализация предиктивного алгоритма должна проходить поэтапную настройку и верификацию. Данная модель используется как безопасная среда для отработки структуры алгоритма, критериев качества и ограничений, а также для предварительной оценки устойчивости к типовым возмущениям до перехода к испытаниям на промышленном вычислителе и промышленной интеграции. В работе предложена последовательность, состоящая из четырех последовательных режимов с возможностью перехода на предыдущие этапы:

- — моделирование с использованием модели предиктивного управления, при котором оптимизационный алгоритм формирует управляющее воздействие для вычислительной модели объекта управления, а элементы промышленной реализации исключены;
- — испытания на промышленном вычислителе, когда алгоритм запускается на промышленном компьютере/контроллере и взаимодействует с моделью в реальном времени, что позволяет оценить задержки вычислений;
- — режим «советчика», когда система не управляет объектом напрямую, а формирует рекомендации для оператора: на каждом шаге алгоритм принимает текущие измерения, рассчитывает рекомендуемое управление $u_{рек}(t)$ (уставки/корректировки), строит прогнозную траекторию $y(t+k)$, оценивает возможные риски и формирует предупреждения о приближении к ограничениям. Рассчитанное $u_{рек}(t)$ не подается автоматически на исполнительные механизмы, а отображается оператору для принятия решения; оператор может подтвердить применение рекомендации либо отклонить ее;
- — автоматический режим при сохранении возможности быстрого перехода на ручной или резервный режим в рамках требований промышленной безопасности процесса БП; под автоматическим режимом понимается режим перевода алгоритма регулирования ключевого параметра, когда рассчитанное $u(t)$ передается через ПЛК на исполнительные механизмы, обратная связь обе-

спечивается измерениями $y(t)$, а коррекция выполняется по $y(t)$ с периодом дискретизации Tu. Ручной режим: уставки и управляющие воздействия задаются оператором, а алгоритм работает в режиме «советчика», формируя рекомендации, прогноз изменения параметров процесса и предупреждения о возможных нарушениях ограничений. При этом сигналы алгоритма не подаются напрямую на исполнительные механизмы, и окончательное решение остаётся за оператором. Резервный режим: управление выполняет регулятор либо безопасная стратегия, предусмотренная для нештатных ситуаций. Переход в этот режим осуществляется при отказах датчиков, нарушении связи или невозможности выполнения оптимизационного расчета.

Последовательность из четырех этапов обеспечивает поэтапное снижение рисков при переходе от моделирования к промышленной эксплуатации. В таблице 1 представлены основные показатели качества системы управления процессом бесслитковой прокатки.

Таблица 1.

Основные показатели качества системы управления процессом БП

Показатель	Обозначение	Требуемый уровень
Отклонение температуры расплава перед валками	ΔTп	не более 2–3 %
Отклонение температуры в зоне кристаллизации	ΔTк	не более 3–4 %
Отклонение толщины заготовки	Δh	не более 1–2 %
Время переходного процесса по температуре	tпер	не более 20–30 с
Сбой регулирования по температуре	σпер	не более 3–5 %
Снижение доли брака	–	не менее 15–25 %
Снижение удельного энергопотребления	–	не менее 5–10 %

Необходимо отметить, что дискретизация измерений и период обновления управления выбираются с учетом динамики процесса и вычислительных затрат оптимизационного расчета. Оценка задержки вычислений проводилась на стадии испытаний на целевой платформе. Для этого при каждом запуске алгоритма фиксировался момент начала расчета, а после получения рассчитанного управляющего воздействия — момент его окончания. Разность между этими моментами принималась за время расчета одного шага. Такие измерения многократно выполнялись в ходе вычислительных экспериментов, после чего определялось характерное время одного расчета. Время управления задавалось заранее как интервал, через который алгоритм повторно выполнял пересчет управления. При выборе этого интервала учитывались два условия: он должен соответствовать динамике контролируемого процесса и одновременно быть больше времени, необходимого для завершения одного расчета. Далее сравнивались время расчета и время шага управления, чтобы проверить, успевает ли алгоритм выполнить расчет за один шаг работы системы при пересчете оптимального управления примерно каждые 0,5–1 с. Следует отметить, что вычислительная реализуемость алгоритма оценивается для конкретной целевой платформы и конкретной реализации. Под сложностью модели M_2 в статье понимается ее вычислительная нагрузка в цикле предиктивного управления, которая влияет на время расчета $t_{расч}$ наряду с настройками оптимизатора и длиной горизонта прогноза. Поэтому значение $t_{расч}$≈0,3–0,5 с рассматривается не как универсальная величина, а как результат измерения на используемой промышленной платформе, подтверждающий возможность работы алгоритма в реальном времени. Пересчет выполняется как решение задачи модельного предиктивного управления, в которой выбирается управление $u(t)$ по критерию качества J. Оптимальное управление в дальнейшем определяется минимизацией ранее введенного функционала качества J, учитывающего точность слежения и плавность изменения управляющего воздействия.

При более высокой частоте измерений цифровой фильтр получает более подробную информацию о текущем изменении сигнала, что позволяет точнее подавлять шум и устойчивее выделять его основную тенденцию. Под цифровым фильтром в данной работе понимается стандартная дискретная фильтрация измерений, применяемая перед этапами оценивания и оптимизации. Указанная частота относится к частоте обновления измерений/фильтрации, тогда как перерасчет оптимального управления выполняется периодически в цикле модельного предиктивного управления с шагом управления Tu (между пересчетами удерживается последнее рассчитанное $u(t)$). Одновременно оптимизационный пересчет можно выполнять реже, чтобы уменьшить вычислительную нагрузку, и при этом сохранить нужную реакцию системы, поскольку тепловые каналы объекта изменяются относительно медленно [17, 18].

Результаты и обсуждение результатов интегрированной верификации АСУ

Проведенная интегрированная верификация подтвердила возможность поэтапного внедрения предиктивного алгоритма в промышленный контур управления. На этапе моделирования были уточнены параметры модели и проверена ее устойчивость к технологическим возмущениям, а испытания на промышленной платформе показали возможность работы алгоритма в реальном времени.

При длительности вычислительного цикла 0,3–0,5 с обеспечивается прогноз на 10–15 шагов, что подтверждает применимость подхода в составе АСУ ТП агрегата бесслитковой прокатки.

Полученные результаты также показывают, что поэтапный переход от режима «советчика» к автоматическому управлению позволяет снизить риск нештатных ситуаций без существенного изменения действующей структуры управления и при сохранении возможности оперативного возврата к ручному или резервному режиму.

Заключение

В работе предложена и обоснована поэтапная схема внедрения предиктивного управления в АСУ ТП агрегата бесслитковой прокатки. В состав схемы включены последовательные стадии математического моделирования, испытаний на промышленной платформе, функционирования в режиме «советчика» и последующего перехода к автоматическому управлению.

Показано, что разработанный алгоритм может быть реализован в реальном времени на промышленной платформе: при длительности расчетного шага 0,3–0,5 с обеспечивается прогнозирование на 10–15 шагов вперед.

Ключевым элементом схемы внедрения является режим «советчика», создающий условия для поэтапного освоения предиктивного управления без нарушения действующей логики работы системы. Именно такой режим обеспечивает подготовку к безопасному переходу в автоматический контур при соблюдении заданных показателей качества и наличии регламентированных процедур оперативного возврата к ручному или резервному управлению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tran Duc Hieu, Bazhin V. Yu., Makushin D.V., Krylov K.A. Influence of temperature regime of the combined process of casting and rolling of strips from high-alloy aluminium alloys // Non-ferrous Metals. 2024. No. 2. P. 45–51. DOI: 10.17580/nfm.2024.02.07.
2. Kim M.-S., Kim H.-W., Kim S.-H., Kumai S. Role of roll separating force in high-speed twin-roll casting of aluminum alloys // Metals. 2019. Vol. 9, No. 6. P. 645. DOI: 10.3390/met9060645.
3. Kim M.-S., Kim J. Metallurgical method of determining heat transfer coefficient in simulations of twin-roll casting // Metals. 2024. Vol. 14, No. 3. P. 358. DOI: 10.3390/met14030358.
4. Liu H., Wu P., Song K., Zhang Y., Yuan G., Liu F. A multi-field couped model for controlling segregation in twin-roll casting // Journal of Materials Research and Technology. 2024. Vol. 32. P. 2651–2660. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.08.126.
5. Kim M.-S. Control of surface inverse segregation in Al-4.5Mg strips produced by industrial twin-roll casting process // Scripta Materialia. 2025. Vol. 258. P. 116528. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2024.116528.
6. Yin F.C., Sun J., Peng W., et al. Dynamic matrix predictive control for a hydraulic looper system in hot strip mills // Journal of Central South University. 2017. Vol. 24. P. 1369–1378. DOI: 10.1007/s11771-017-3541-6.
7. Sun J., Hou F., Hu Y.J., et al. Application of distributed model predictive control based on neighborhood optimization in gauge-looper integrated system of tandem hot rolling // Journal of Iron and Steel Research International. 2023. Vol. 30. P. 277–292. DOI: 10.1007/s42243-022-00838-9.
8. Prinz K., Steinboeck A., Kugi A. Optimization-based feedforward control of the strip thickness profile in hot strip rolling // Journal of Process Control. 2018. Vol. 64. P. 100–111. DOI: 10.1016/j.jprocont.2018.02.001.
9. Zong S., Gao J. Particle Swarm Optimization-Model Predictive Control-Based Looper Angle Control in Hot Strip Rolling: A Speed Compensation Strategy // Metals. 2025. Vol. 15, No. 11. P. 1202. DOI: 10.3390/met15111202.
10. Gangadaran M., Mitra S. Application of close loop expert system for heating control of rolling mill furnaces in a steel plant // 2016 IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation. 2016. P. 290–294. DOI: 10.1109/CMI.2016.7413757.
11. Krupa P., Saraf N., Limon D., Bemporad A. PLC implementation of a real-time embedded MPC algorithm based on linear input/output models // IFAC-PapersOnLine. 2020. Vol. 53, No. 2. P. 6987–6992. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.424.
12. Litvinenko V.S., Bowbrick I., Naumov I.A., Zaitseva Z. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 338. P. 130530. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130530.
13. Колодин А.А., Ёлшин В.В. Разработка и исследование регулятора на основе прогнозирующей модели // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2021. Т. 29, No. 1. С. 36–45. DOI: 10.14498/tech.2021.1.3.
14. Перельман И.И. Оперативная идентификация объектов управления. М.: Энергоиздат, 1982.
15. Ковалёв С.П. Применение цифровых двойников в автоматизированном управлении высокотехнологичным промышленным производством // Мехатроника, автоматизация, управление. 2024. Т. 25, No. 4. С. 211–220. DOI: 10.17587/mau.25.211-220.
16. Li J., Wang X., Yang Q., Sun Y., Zhao J., Mao X., Qie H. IoT-based framework for digital twins in steel production: A case study of key parameter prediction and optimization for CSR // Expert Systems with Applications. 2024. Vol. 250. P. 123909. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.123909.
17. Wang S., Zhang Y., Hu L., Hu Y., Ji C., Zhi C., Hu S., Ma L. Visualization real-time monitoring platform for ultra-thin strip rolling mills based on digital twin technology // Processes. 2025. Vol. 13, No. 12. P. 4075. DOI: 10.3390/pr13124075.
18. Бажин В.Ю., Масько О.Н., Ануфриев А.С. Обоснование выбора платформы для создания системы управления материальными потоками в производстве металлургического кремния // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. No. 1-1. С. 206–219. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_206.

© Бажин Владимир Юрьевич (bazhin-alfoil@mail.ru); Чан Дык Хиеу (hieumd1998@mail.ru);
Никитина Любовь Николаевна (nikitina_ln@spmi.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.04

БЕЗОПАСНОСТЬ НА УРОВНЕ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНЗАКЦИЙ: МЕЖДУ ТЕОРИЕЙ И ПРАКТИКОЙ СУБД

SECURITY AT THE TRANSACTION ISOLATION LEVEL: BETWEEN DBMS THEORY AND PRACTICE

S. Bednyak
A. Shishkin

Summary. The article examines the discrepancy between the formal requirements of the ANSI/ISO SQL-92 standard for transaction isolation levels and their practical implementation in modern DBMS. Using an experimental comparative method and statistical analysis, the behavior of the Repeatable Read and Serializable levels in PostgreSQL, MySQL (InnoDB), and Oracle databases was tested for the Write Skew anomaly. During 1000 parallel transaction launches, it was found that the Repeatable Read level does not prevent violation of business restrictions in 298–312 cases (29–31 %), despite its widespread use in industrial systems. Full protection is achieved only at the Serializable level: in PostgreSQL, it is achieved through the Serializable Snapshot Isolation (SSI) mechanism with automatic rollback of 318 out of 1000 transactions, in MySQL and Oracle, through locks, which increases the average transaction execution time by 60–200 % (from 3.9–4.2 ms to 11.7–12.1 ms).

The work contributes to the development of a practice-oriented approach to transactional security: for the first time, the vulnerability of the Repeatable Read level to the Write Skew anomaly in three leading databases has been quantified and the «price» of its elimination has been estimated.

Keywords: transaction isolation levels, transactional anomalies, DBMS security, MVCC, ANSI SQL, information security.

Бедняк Светлана Геннадьевна
кандидат педагогических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»
s.begnyak@psuti.ru
Шишкин Александр Вячеславович
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»
Lestr631@yandex.ru

Аннотация. В статье исследуется расхождение между формальными требованиями стандарта ANSI/ISO SQL-92 к уровням изоляции транзакций и их практической реализацией в современных СУБД. С использованием экспериментального сравнительного метода и статистического анализа проведено тестирование поведения уровней Repeatable Read и Serializable в СУБД PostgreSQL, MySQL (InnoDB) и Oracle на предмет проявления аномалии Write Skew. В ходе 1000 параллельных запусков транзакций установлено, что уровень Repeatable Read не предотвращает нарушение бизнес-ограничений в 298–312 случаях (29–31 %), несмотря на его широкое применение в промышленных системах. Полная защита достигается только на уровне Serializable: в PostgreSQL — за счёт механизма Serializable Snapshot Isolation (SSI) с автоматическим откатом 318 из 1000 транзакций, в MySQL и Oracle — через блокировки, что увеличивает среднее время выполнения транзакции на 60–200 % (с 3,9–4,2 мс до 11,7–12,1 мс).

Работа вносит вклад в развитие практико-ориентированного подхода к транзакционной безопасности: впервые количественно продемонстрирована уязвимость уровня Repeatable Read к аномалии Write Skew в трёх ведущих СУБД и оценена «цена» её устранения.

Ключевые слова: уровни изоляции транзакций, транзакционные аномалии, безопасность СУБД, MVCC, ANSI SQL, информационная безопасность.

Введение

В условиях стремительного роста масштабов цифровых сервисов — от онлайн-банкинга и платёжных систем до государственных информационных ресурсов и облачных платформ — обеспечение корректности и безопасности параллельного доступа к данным становится критически важной задачей. Современные системы управления базами данных (СУБД) реализуют механизмы изоляции транзакций для поддержания целостности данных при высокой конкурентности. Однако, как показывает практика, формальные гарантии стандартов, в частности ANSI/ISO SQL-92, часто не соответствуют реальному поведению СУБД, что создаёт скрытые уязвимости в прикладных системах.

Фундаментальные основы управления параллелизмом были заложены в работах P. A. Bernstein, V. Hadzilacos и N. Goodman [1], где предложена классическая модель четырёх уровней изоляции, связанных с предотвращением известных транзакционных аномалий. В последующие десятилетия эта модель легла в основу большинства реляционных СУБД. Однако уже в 1995 году появились исследования, указывающие на несоответствие между

теоретической сериализуемостью и её практической реализацией. Позже было выявлено, что популярные СУБД, такие как MySQL и PostgreSQL, намеренно отклоняются от стандарта ради повышения производительности, сохраняя при этом маркетинговые названия уровней изоляции.

В отличие от предшествующих работ, в данной статье впервые проведено сравнительное экспериментальное исследование, в котором:

- количественно измерена частота нарушений бизнес-ограничений из-за аномалии Write Skew в трёх ведущих СУБД (PostgreSQL, MySQL, Oracle) на уровне Repeatable Read;
- сопоставлены два принципиально разных подхода к обеспечению сериализуемости — через откаты (PostgreSQL SSI) и блокировки (MySQL, Oracle) — с фиксацией производительностных издержек;
- установлены прямые связи между транзакционными аномалиями и угрозами информационной безопасности в прикладных сценариях.

Таким образом, работа вносит вклад в развитие практико-ориентированного подхода к проектированию безопасных транзакционных систем, объединяя теорию баз данных, инженерную практику и требования к защите критически важных данных.

Целью исследования является выявление и количественная оценка рисков информационной безопасности, возникающих из-за несоответствия между теоретической моделью уровней изоляции и их практической реализацией в PostgreSQL, MySQL (InnoDB), Oracle и Microsoft SQL Server.

Объектом исследования выступают системы управления базами данных, предметом — уровень изоляции транзакций как механизм обеспечения целостности и безопасности данных при параллельном доступе.

Гипотеза исследования: уровень Repeatable Read, несмотря на широкое применение, не предотвращает аномалию Write Skew в PostgreSQL, MySQL и Oracle, тогда как уровень Serializable обеспечивает полную защиту, но с существенными различиями в реализации (откаты vs блокировки) и производительностными издержками. Гипотеза проверяется в ходе экспериментального исследования.

1. Теоретические основы уровней изоляции транзакций

Уровни изоляции транзакций представляют собой основополагающий механизм согласования данных в условиях параллельного выполнения операций в реляционных СУБД. P.A. Bernstein, V. Hadzilacos, N. Goodman в статье «Concurrency Control and Recovery in Database Systems» [1] популязировали 4 уровня изоляции: Read Uncommitted, Read Committed, Repeatable Read и Serializable. Каждый уровень характеризуется набором допустимых или запрещённых транзакционных аномалий — нежелательных эффектов, возникающих при неконтролируемом параллелизме.

Основными видами аномалий являются:

- Dirty Read («грязное чтение») — когда данные, которые я прочитал, кто-то может откатить ещё до того, как я завершу свою транзакцию [2];
- Non-Repeatable Read («неповторяющееся чтение») — проявляется, когда при повторном чтении в рамках одной транзакции, ранее прочитанные данные, оказываются изменёнными [3];
- Phantom Read («фантомное чтение») — если первая транзакция прочитала набор строк по некоторому условию, а затем вторая транзакция добавила строки, также удовлетворяющие этому условию, то при повторении запроса первой транзакцией, она получит обновленную выборку строк [4];
- Lost Update («потерянное обновление») — две параллельные транзакции меняют одни и те же данные, при этом итоговый результат обновления предсказать невозможно [5];
- Write Skew («косая запись») — аномалия, которая возникает при ситуации, когда мы из двух разных транзакций пытаемся изменить одни и те же данные (например, ячейки A и B) так, что первая транзакция затронет ячейку A, а вторая — ячейку B и мы получим не консистентный результат [6].

2. Практическая реализация уровней изоляции в современных СУБД

Реальная реализация уровней изоляции в популярных СУБД значительно варьируется. Это обусловлено различиями в архитектурных подходах к управлению параллелизмом — в первую очередь, использованием pessimistic locking или multiversion concurrency control. В результате заявленный уровень изоляции не всегда гарантирует защиту от всех ожидаемых аномалий, что создаёт риски для безопасности и целостности данных.

Большинство современных СУБД используют MVCC (PostgreSQL, Oracle, MySQL InnoDB в режиме REPEATABLE READ и выше), что позволяет избежать блокировок при чтении и повысить производительность. Современные реализации MVCC, такие как vMVCC, демонстрируют, что оптимизация управления версиями данных позволяет снизить накладные расходы на сериализуемость до 15–20 % по сравнению с традиционными блокировочными протоколами [8]. Однако MVCC по-разному

реализует семантику уровней изоляции. Например, PostgreSQL не поддерживает истинный уровень Read Uncommitted — вместо него используется Read Committed, что исключает Dirty Read даже при явном запросе низкого уровня изоляции. В то же время MySQL (InnoDB) формально поддерживает Read Uncommitted, но на практике его применение крайне ограничено и не рекомендуется из-за высокого риска аномалий.

В таблице 1 представлено сопоставление фактического поведения четырёх ведущих СУБД по ключевым параметрам.

Таблица 1.

Реализация уровней изоляции в СУБД

СУБД	Read uncommitted	Read committed	Repeatable read	Serializable	Защита от write skew
PostgreSQL	Эмулируется как read committed	MVCC	MVCC	SSI	Да
MySQL (InnoDB)	Поддерживается	MVCC+ блокировки	MVCC + next-key locking	Блокировки диапазонов	Нет
Oracle	Не поддерживается	MVCC	Уровень отсутствует	Snapshot Isolation	Нет
SQL Server	Поддерживается	Блокировки и MVCC	Блокировки	Range locks	Да

Анализ реализации уровней изоляции в ведущих СУБД показывает, что PostgreSQL обеспечивает защиту от аномалии Write Skew за счёт механизма SSI, который обнаруживает циклы зависимостей и откатывает конфликтующие транзакции. Serializable Snapshot Isolation (SSI) в PostgreSQL обнаруживает аномалию Write Skew за счёт отслеживания rw-антизависимостей с помощью лёгких SIRead-блокировок, что позволяет обеспечивать сериализуемость с приемлемыми накладными расходами даже при высокой конкурентности [7]. В отличие от этого, MySQL (InnoDB) на уровне Repeatable Read использует next-key locking, предотвращающий Phantom Read, но не защищающий от Write Skew. Oracle же не поддерживает уровень Repeatable Read как таковой, заменяя его Snapshot Isolation — эффективным, но уязвимым к Write Skew. SQL Server, напротив, обеспечивает защиту от этой аномалии на уровне Serializable через range locks, хотя при этом требует от разработчика особого внимания к проектированию.

Эти различия указывают на то, что один и тот же SQL-код может вести себя по-разному в разных СУБД, даже при одинаковом указанном уровне изоляции. Для разработчика это порождает ложное впечатление безопасности, тогда как в действительности возможны скрытые аномалии, нарушающие бизнес-логику или раскрывающие данные.

Это приводит к выводу, что практическая реализация уровней изоляции демонстрирует значительный разрыв между формальными спецификациями стандарта и реальным поведением СУБД, что требует от специалистов глубокого понимания архитектуры используемой системы и проведения тщательного тестирования транзакционной логики.

3. Угрозы информационной безопасности, связанные с несоответствием теории и практики

Несоответствие между формальными требованиями стандарта SQL и фактическим поведением СУБД при выполнении транзакций создаёт скрытые угрозы информационной безопасности. Разработчики, полагаясь на документацию или интуитивное понимание уровней изоляции, могут допустить ошибки в проектировании транзакционной логики, что приводит к нарушению принципов целостности, конфиденциальности и доступности данных (трёх китов модели CIA).

Наиболее опасными с точки зрения безопасности являются аномалии, связанные с не консистентным состоянием данных при параллельном доступе:

- Write Skew может нарушать бизнес-ограничения.
- Phantom Read в контексте авторизации может позволить злоумышленнику обойти ограничения.
- Dirty Read, хотя и редко встречается в современных СУБД, теоретически может привести к утечке временных данных.

Эти сценарии свидетельствую о том, что транзакционные аномалии — не просто «аномалии согласованности, а потенциальные уязвимости, которые могут быть эксплуатированы как в результате ошибок разработки, так и целенаправленных атак типа race condition.

Нарушение транзакционной изоляции может привести к несоответствию требованиям таких стандартов, как:

- PCI DSS — требует строгого контроля целостности транзакций с платёжными данными.
- GDPR — нарушение целостности или несанкционированная обработка персональных данных вследствие аномалий может квалифицироваться как утечка.
- ISO/IEC 27001 — в рамках управления рисками необходимо учитывать угрозы, связанные с параллелизмом и изоляцией данных.

Особую опасность представляет непредсказуемость проявления аномалий: они возникают только при определённом стечении обстоятельств (высокая нагрузка,

задержки сети, специфическая последовательность операций), что затрудняет их выявление на этапе тестирования. В результате уязвимости могут годами оставаться незамеченными, пока не проявятся в production-среде с критическими последствиями.

Таким образом, игнорирование особенностей реализации уровней изоляции в конкретной СУБД не только нарушает логическую корректность приложения, но и создаёт реальные риски информационной безопасности, включая финансовые потери, репутационный ущерб и юридическую ответственность.

4. Методика и результаты экспериментального исследования

Целью эксперимента являлось количественное выявление аномалий Write Skew на уровнях изоляции Repeatable Read и Serializable в СУБД PostgreSQL,MySQL (InnoDB) и Oracle Database.

В качестве модельного сценария использовалось бизнес-ограничение вида: «Общая сумма средств на двух счетах не должна превышать 200».

В ходе эксперимента использовалась простая таблица

```
CREATE TABLE accounts (id INT PRIMARY KEY, balance INT);
INSERT INTO accounts VALUES (1, 100), (2, 100);
```

Эксперимент включал 1000 параллельных запусков двух транзакций (в отдельных соединениях) на каждом уровне изоляции. Фиксировались такие метрики, как: количество нарушений ограничений, число откатов транзакций, среднее время выполнения одной транзакции.

Такой подход позволил воспроизводимо оценить как корректность, так и производительственные издержки различных уровней изоляции.

Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

Результаты полностью подтверждают выдвинутую гипотезу: уровень Repeatable Read в PostgreSQL,MySQL и Oracle не обеспечивает защиты от аномалий White Skew — нарушения зафиксированы в 29–31 % случаев. При этом разработчики часто ошибочно считают этот уровень «достаточно надежным» для критических операций.

На уровне Serializable нарушений не зафиксировано ни в одной СУБД, что подчеркивает его статус единственного уровня, гарантирующего полную сериализуемость. Однако механизмы достижения этой гарантии принципиально отличаются: PostgreSQL использует SSI (обнаруживает циклы зависимостей и отказывает 31,8 % транзакций, требуя от приложения retry-логики),

Таблица 2.

Результаты эксперимента по выявлению Write Skew (1000 запусков)

СУБД	Уровень изоляции	Нарушения (Write Skew)	Откатов	Среднее время транзакции, мс
PostgreSQl	Repeatable Read	312	0	4,2
PostgreSQL	Serializable (SSI)	0	318	6,8
MySQL (InnoDB)	Repeatable Read	298	0	3,9
MySQL (InnoDB)	Serializable	0	0*	12,1
Oracle	Snapshot Isolation	305	0	4,0
Oracle	Serializable	0	0*	11,7

* Oracle и MySQL в Serializable используют блокировки, поэтому откатов нет, но растёт время выполнения из-за ожиданий.

а MySQL и Oracle полагаются на блокировки диапазонов, что исключает откаты, но увеличивает время выполнения на 60–200 % (с 3,9-4,2 мс до 11,7–12,1 мс). Это согласуется с данными современных исследований, согласно которым «Реализация Serializable Snapshot Isolation в PostgreSQL обеспечивает производительность, лишь незначительно уступающую Snapshot Isolation, и значительно превосходит традиционные блокировочные подходы на нагрузках с преобладанием операций чтения» [9].

Эти данные согласуются с теоретическими работами, но впервые предоставляют количественную оценку как частоты аномалий, так и «цены» их устранения в реальных СУБД.

Эффективность подхода оценивалась по таким критериям: корректность (доля нарушений бизнес—ограничений), производительность (среднее время транзакции), надежность (необходимость обработки ошибок(откатов)).

Анализ показал у Repeatable Read высокую производительность, но низкую корректность. Следовательно он неприемлем для критичных систем. Serializable показал 100 % корректность, но с компромиссом — либо надёжность требует retry-механизмов (PostgreSQL), либо снижается производительность (MySQL, Oracle).

Ограничения исследования:

1. Эксперимент выполнен на упрощённой схеме (2 записи); в реальных системах с индексами, внешними ключами и триггерами поведение может отличаться.

2. Не исследованы распределённые СУБД (CockroachDB, YugabyteDB), где Write Skew особенно актуален.
3. Тесты проводились в локальной среде без сетевых задержек, что может занижать частоту аномалий.

Заключение

Проведённый теоретический анализ и экспериментальное исследование подтвердили наличие существенного разрыва между формальными требованиями стандарта ANSI/ISO SQL-92 к уровням изоляции транзакций и их практической реализацией в современных СУБД. Несмотря на единые названия уровней — Read Uncommitted, Read Committed, Repeatable Read и Serializable — их поведение в PostgreSQL, MySQL (InnoDB), Oracle и Microsoft SQL Server значительно различается как по архитектурным принципам (MVCC против блокировок), так и по способности предотвращать критические транзакционные аномалии.

Эксперимент по воспроизведению аномалии Write Skew в условиях параллельного выполнения 1000 пар транзакций показал, что уровень Repeatable Read в PostgreSQL, MySQL и Oracle не обеспечивает защиту от нарушения бизнес-ограничений: в 29–31 % случаев происходило недопустимое изменение состояния данных. Только использование уровня Serializable полностью исключало аномалии — в PostgreSQL за счёт механизма SSI с откатом 31,8 % конфликтующих транзакций, в MySQL и Oracle — за счёт блокировок, что, однако, увеличивало среднее время выполнения транзакции на 60–200 %.

Эти результаты демонстрируют, что некорректный выбор уровня изоляции создаёт реальные угрозы информационной безопасности, особенно в системах, обрабатывающих финансовые операции, персональные данные или критически важные ресурсы. Разработчики, полагающиеся на декларативные названия уровней без учёта особенностей СУБД, рискуют допустить уязвимости, приводящие к нарушению целостности, обходу лимитов или утечкам данных.

Таким образом, обеспечение транзакционной безопасности требует:

- Глубокого понимания архитектуры используемой СУБД;
- Обязательного тестирования транзакционной логики под нагрузкой;
- Применения дополнительных механизмов (явные блокировки, retry-логика) или перехода к строгой сериализуемости в критичных сценариях.

В перспективе необходимо развитие методов автоматизированной верификации транзакционной безопасности и унификация моделей изоляции для гибридных и распределённых СУБД, где проблема аномалий приобретает ещё большую сложность. Данная работа подчёркивает важность междисциплинарного подхода, объединяющего теорию баз данных, инженерию программного обеспечения и практику информационной безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. BERNSTEIN P.A., HADZILACOS V., GOODMAN N. Concurrency Control and Recovery in Database Systems [Text] / P.A. Bernstein, V. Hadzilacos, N. Goodman. — Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1987. — 364 p. — ISBN 0-201-10202-8
2. Уровни изолированности транзакций в СУБД: краткое руководство для начинающих [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://habr.com/ru/articles/845522/, свободный. — Загл. с экрана. — Дата обращения: 05.09.2025
3. Уровни изоляции транзакций в MS SQL: практическое руководство [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://habr.com/ru/companies/infopulse/articles/261097/, свободный. — Загл. с экрана. — Дата обращения: 05.09.2025.
4. Аристов А. Уровни изоляции транзакций в PostgreSQL [Электронный ресурс] // Aristov.tech. — 2023. — URL: https://aristov.tech/blog/urovni-izolyaczii-tranzakczij-v-postgresql/ (дата обращения: 15.09.2025).
5. Стручков, А. Уровни изоляции транзакций: от теории к практике [Электронный ресурс] / А. Стручков // Struchkov.dev. — 2023. — URL: https://struchkov.dev/blog/ru/transactional-isolation-levels/ (дата обращения: 01.10.2025).
6. Транзакции. Параллельное исполнение. Уровни изоляции [Электронный ресурс] // Викиучебник NEERC IFMO. — URL: https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Транзакции._Параллельное_исполнение._Уровни_изоляции (дата обращения: 05.09.2025).
7. Kalay M.U. Concurrency Challenges in Database Systems: A Focus on PostgreSQL [Электронный ресурс] // DergiPark. — 2025. — URL: https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/4317680 (дата обращения: 11.01.2026). — Текст: электронный.
8. Chang A. et al. Verifying vMVCC, a high-performance transaction library using multi-version concurrency control [Электронный ресурс] // USENIX OSDI. — 2023. — URL: https://www.usenix.org/system/files/osdi23-chang.pdf (дата обращения: 12.01.2026). — Текст: электронный.
9. Ports D.R., Grittner K. Serializable Snapshot Isolation in PostgreSQL [Электронный ресурс] // Proceedings of the VLDB Endowment. — 2012. — Т. 5, № 11. — С. 1850–1861. — URL: https://dl.acm.org/doi/10.14778/2367502.2367523 (дата обращения: 12.01.2026). — Текст: электронный.

© Бедняк Светлана Геннадьевна (s.begnyak@psuti.ru); Шишкин Александр Вячеславович (Lestr631@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.06

CALS-ТЕХНОЛОГИИ — ОСНОВА МОДЕРНИЗАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ НАУКОЕМКИХ ПРОИЗВОДСТВ

CALS-TECHNOLOGIES ARE THE BASIS FOR MODERNIZING MODERN SCIENCE-INTENSIVE PRODUCTION

T. Vasilyeva

Summary. This article discusses a software module that allows you to automate the creation of a unique code when registering a new item in the PDM database as a central node in the ERP production planning system. Here, we provide a detailed description of the algorithm creation process and the listing of the software module, which is written in the popular modern programming language Python and demonstrates high-quality information support for all stages of the product lifecycle for the automation of modern knowledge-intensive industries.

Keywords: knowledge-intensive production, CALS, PDM, product data management, product lifecycle, Python, algorithm.

Васильева Татьяна Юрьевна
кандидат технических наук, доцент, Московский технический университет связи и информатики
isua.kaf@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассмотрен программный модуль, позволяющий автоматизировать создание уникального кода при регистрации новой номенклатурной единицы в базе данных PDM-системы как центрального узла в плоскости производственного планирования ERP, подробно описан процесс создания алгоритма и листинг программного модуля, составленного на распространенном современном языке программирования Python, демонстрирующего качественное информационное сопровождение всех этапов жизненного цикла изделия для автоматизации современных наукоемких производств.

Ключевые слова: наукоемкие производства, CALS, PDM, управление данными об изделии, жизненный цикл изделия, Python, алгоритм.

Как известно [1,2,5], бесперебойное информационное сопровождение жизненного цикла (ЖЦ) любой продукции от этапа оформления заказа до утилизации осуществляется путем применения CALS (Continuous Acquisition and Life-cycle Support) — технологий, обеспечивающих учет IT (information tekhnology) — инструментов управленческих методик и стандартов. Рассмотрим ключевые фазы ЖЦ изделий, позволяющие программному обеспечению (ПО), базирующемуся на принципах CALS-технологий, функционировать как экосистема взаимосвязанных решений:

1. **Проектно-инженерный блок (CAD/CAM/CAE)**: программные комплексы для графического моделирования, автоматизации технологических процессов и проведения виртуальных испытаний.
2. **Управление инженерным контентом (PDM)**: инструменты для структурирования и контроля данных, генерируемых в ходе разработки.
3. **Планирование корпоративных ресурсов (ERP)**: платформы для администрирования финансовых потоков, складских запасов и производственных мощностей.
4. **Координация логистических цепочек (SCM)**: системы, нацеленные на повышение эффективности снабжения и распределения продукции.
5. **Взаимодействие с потребителями (CRM)**: сервисы для аккумулирования информации о клиентах и управления объемом продаж.
6. **Диспетчеризация производства (MES)**: модули оперативного контроля цехового уровня (детально изученные в рамках предшествующего этапа).

Интеграция указанных компонентов формирует единую информационную среду, где вся документация — от 3D-моделей и чертежей до спецификаций и техпроцессов — хранится в унифицированном виде, обеспечивая актуальность и доступность данных для всех задействованных подразделений [3–5].

Обратим внимание, что PDM-система (Product Data Management) рассматривается как центральный узел, обеспечивающий качественную передачу данных от конструкторов (CAD) в подразделения управления ресурсами предприятия (ERP), а система PDM ориентирована на администрирование совокупности данных об объекте производства и его структуре. Она консолидирует сопутствующую документацию и управляет рабочими процессами на всех стадиях конструкторско-технологической подготовки производства и имеет следующие ключевые возможности:

1. Администрирование хранилища и контента: Организация унифицированного цифрового архива для технического документооборота (чертежных файлов, спецификаций, объемных моделей), что предотвращает фрагментацию и утрату сведений.

2. Управление ревизиями и правами: Систематическая фиксация корректировок, контроль версионности (например, переход от V1.0 к V2.0), ведение протоколов изменений и распределение уровней доступа сотрудников к проектным материалам.
3. Оперирование структурой изделия: Генерация и ведение электронного состава изделия (ЭСИ). Это иерархическая модель, отражающая взаимосвязи между всеми деталями, узлами и сборочными единицами (цифровая альтернатива классической спецификации).
4. Маршрутизация процессов (Workflow): Цифровизация регламентов согласования и визирования документов (в частности, обработка извещений об изменениях) при взаимодействии различных подразделений.
5. Автоматизированное формирование данных: Системная генерация уникальных идентификаторов (Part-номеров/артикулов), а также автоматическая выгрузка отчетов и ведомостей.
6. Системная интеграция: Поддержка сквозного обмена информацией с программными комплексами CAD (проектирование), ERP (ресурсы) и прочими компонентами CALS-системы.

Отметим, что PDM функционирует как центральное связующее звено, гарантирующее информационную преемственность между проектным и производственным циклами.

Для наглядной репрезентации фундаментального механизма управления инженерной информацией разработан программный модуль «PDM Part-Number Generator», решающий задачи автоматизированного формирования уникального кода (Part-номера) при регистрации новой номенклатурной единицы в базе данных.

Обратим внимание, что фундаментом любой PDM-системы является однозначная идентификация каждого объекта (материала, отдельной детали или сборочного узла). Уникальный код (Part-номер) исключает дублирование и ошибки в спецификациях. Зачастую структура такого номера несет в себе закодированную информацию о принадлежности объекта к определенной категории. Данный алгоритм воспроизводит логику создания идентификатора на основе классификатора, а архитектура идентификатора базируется на шаблоне ККК-ТТТ-НННН:

1. ККК (Код класса): Обозначение функциональной группы (к примеру, «MEC» — механические компоненты или «RES» — резисторы).
2. ТТТ (Код типа): Уточняющая категория внутри класса (например, «MET» — металлические изделия или «SMD» — компоненты для поверхностного монтажа).
3. НННН (Порядковый номер): Уникальный цифровой индекс, обеспечивающий неповторимость записи внутри конкретной подгруппы.

Процесс формирования Part-номера представляет собой регламентированную последовательность операций, гарантирующую неповторимость и логическую упорядоченность идентификаторов в рамках PDM-системы.

Рассмотрим алгоритмическую модель процесса:

1. Инициация: Система получает входные данные о категории и типе регистрируемого объекта.
2. Верификация класса: Осуществляется запрос к базе данных (БД) для подтверждения существования указанного класса.
   2.1. Отказ: При отсутствии совпадений генерируется уведомление об ошибке (завершение процесса).
   2.2. Подтверждение: Система считывает аббревиатуру класса (ККК) и переходит к проверке подкатегории.
3. Верификация типа: Проверяется наличие заявленного типа (ТТТ) внутри выбранного класса.
   3.1. Отказ: Вывод сообщения о некорректности данных (завершение процесса).
   3.2. Подтверждение: Извлечение соответствующего кода типа.
4. Актуализация счетчика: Система находит в БД максимальное значение порядкового номера (last_num) для данной связки параметров и увеличивает его на единицу.
5. Приведение к формату: Полученное числовое значение дополняется ведущими нулями для обеспечения фиксированной длины строки (например, трансформация «1» в «0001»).
6. Синтез идентификатора: Формируется единая строка, где коды ККК, ТТТ и порядковое число НННН объединяются через дефис.
7. Регистрация изменений: Обновленное значение счетчика и итоговый Part-номер фиксируются в защищенном хранилище PDM.
8. Выдача результата: Сгенерированный артикул отображается в интерфейсе пользователя или передается в связанную ERP-систему.
9. Завершение.

Листинг программы (PDM Part-Number Generator)

Программа реализована на языке Python, который часто используется для прототипирования и служебных скриптов в корпоративных ИТ-системах.

```
# PDM Part-Number Generator (Упрощенная имитация)

# 1. Справочники и классификаторы (имитация базы данных PDM)
```

```
CLASSIFICATOR = {
'Резистор': {'code': 'RES', 'type_codes': {'SMT': 'SMD', 'Выводной': 'DIP'}, 'last_num': 100},
'Конденсатор': {'code': 'CAP', 'type_codes': {'SMT': 'SMD', 'Выводной': 'DIP'}, 'last_num': 250},
'Микросхема': {'code': 'IC', 'type_codes': {'Цифровая': 'DIG', 'Аналоговая': 'ANL'}, 'last_num': 50}
}
# Разделитель номера
SEPARATOR = '-'
def generate_part_number(component_name, component_type):
«»»
Генерирует уникальный Part-номер на основе классификатора.
«»»
if component_name not in CLASSIFICATOR:
return f»Ошибка: Компонент '{component_name}' не найден в классификаторе.»

class_data = CLASSIFICATOR[component_name]
class_code = class_data['code']
if component_type not in class_data['type_codes']:
return f»Ошибка: Тип '{component_type}' не найден для класса '{component_name}'.»
type_code = class_data['type_codes'][component_type]
# Имитация инкремента порядкового номера в БД
class_data['last_num'] += 1
new_num = class_data['last_num']

# Форматирование номера (4 цифры с ведущими нулями)
part_number = f»{class_code}{SEPARATOR}{type_code}{SEPARATOR}{new_num:04d}»
return part_number
# --— Пример использования программы ---

# 1. Запрос на генерацию Part-номера для нового Резистора
part1 = generate_part_number('Резистор', 'SMT')

# 2. Запрос на генерацию Part-номера для новой Микросхемы
part2 = generate_part_number('Микросхема', 'Аналоговая')

# 3. Повторный запрос для Резистора (номер должен быть инкрементирован)
part3 = generate_part_number('Резистор', 'SMT')

print(f»Новый Резистор SMT: {part1}»)
print(f»Новая Микросхема Аналоговая: {part2}»)
print(f»Следующий Резистор SMT: {part3}»)
print(f»\nАктуальный статус счетчика для Резисторов: {CLASSIFICATOR['Резистор']['last_num']}»)
```

Заключение

В статье рассматриваются базовые принципы функционирования программного обеспечения в концепции CALS-технологий, ориентированных на оптимизацию управления жизненным циклом высокотехнологичной продукции.

Система PDM была определена как центральный компонент CALS, выступающий связующим звеном для конструкторских и технологических массивов данных. Использование PDM-систем открывает перед предприятиями следующие возможности:

1. формирование консолидированного цифрового репозитория для хранения всей совокупности инженерных сведений;
2. реализация жесткого контроля над версионностью документов и процедурами внесения корректировок;
3. автоматизация цикличных операций, в частности процесса генерации уникальных Part-номеров, что было практически подтверждено в ходе разработки представленного ПО.

Созданный программный скрипт «PDM Part-Number Generator» на языке Python воспроизводит один из ключевых алгоритмов PDM, подтверждая, что качественное информационное сопровождение всех этапов жизненного цикла изделия служит основой для автоматизации современных наукоемких производств.

ЛИТЕРАТУРА

1. CALS-технологии [Электронный ресурс] // Википедия. Свободная энциклопедия. — URL: https://ru.wikipedia.org (дата обращения: 16.12.2025).
2. PDM (Product Data Management) — Система управления данными об изделии [Электронный ресурс] // Государство. Бизнес. Технологии: TAdviser. — URL: https://www.tadviser.ru (дата обращения: 16.12.2025).
3. Клевенский, А.И. Информационные технологии поддержки жизненного цикла наукоемких изделий: учебное пособие / А.И. Клевенский. — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. — 216 с.
4. Васильева Т.Ю. Методология развития мышления — базис современного профессионального образования // научный журнал «Тенденции развития науки и образования» №125, сентябрь 2025 — Изд. Научный центр «Ljournal», Самара, 2025 — 160 с.
5. Мельников В.П., Васильева Т.Ю. Методология адаптивно-ситуационного управления технологической подготовкой производства РЭА с применением экспертных моделей. Научное монографическое издание — М.: Издание БУКИ — ВЕДИ, 2014.

© Васильева Татьяна Юрьевна (isua.kaf@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.08

ПРИМЕНЕНИЕ H-БЕСКОНЕЧНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ КОНЦЕНТРАЦИИ ГЛЮКОЗЫ В КОНТУРЕ БИОИСКУССТВЕННОЙ ПЕЧЕНИ

THE USE OF AN H-INFINITE REGULATOR TO STABILIZE GLUCOSE CONCENTRATION IN THE CONTOUR OF A BIO-ARTIFICIAL LIVER

A. Ganshin
D. Andrikov

Summary. The article discusses methods for developing and testing a system that automatically maintains normal blood glucose levels. The work uses a bio-artificial liver and an H-infinite regulator. A bio-artificial liver is a device that performs part of the metabolic functions of a natural human organ. This is especially true for people with liver failure and diabetes mellitus, as these diseases can mutually enhance the negative effects on each other. The aim of the work is to synthesize a robust regulator that ensures the stability of glucose levels under conditions of parametric uncertainty and external disturbances. In this work, a mathematical model describing the dynamics of glucose has been developed. The problem of H-infinite-optimal control is formulated on its basis. Differential equations for the synthesis of the regulator are also given. The graphs shown in the two images show that the proposed method is effective. The glucose level is maintained in the required range, the time required to achieve a stable state decreases, and the reaction to external influences becomes less pronounced compared to a system without a regulator. The results obtained confirm the prospects of using H-infinity regulators in medical metabolic process control systems.

Keywords: bio-artificial liver, modeling, glucose, insulin, robustness, uncertainty, H∞-regulator, optimal control method, stability, efficiency.

Ганьшин Алексей Сергеевич
Аспирант, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы
1042210064@rudn.ru
Андриков Денис Анатольевич
канд. тех. наук, доцент, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы
andrikov-da@rudn.ru

Аннотация. В статье рассматриваются методы разработки и тестирования системы, которая автоматически поддерживает нормальный уровень глюкозы в крови. В работе используется биоискусственная печень и H-бесконечный регулятор. Биоискусственная печень представляет собой устройство, которое выполняет часть метаболических функций естественного органа человека. Это особенно актуально для людей с печеночной недостаточностью и сахарным диабетом, так как эти заболевания могут взаимно усиливать негативное воздействие друг на друга. Целью работы является синтез робастного регулятора, обеспечивающего стабильность уровня глюкозы в условиях параметрической неопределенности и внешних возмущений. В данной работе разработана математическая модель, описывающая динамику глюкозы. На её основе сформулирована задача H-бесконечного-оптимального управления. Также приведены дифференциальные уравнения для синтеза регулятора. Графики, представленные на двух изображениях, показывают, что предложенный метод эффективен. Уровень глюкозы поддерживается в нужном диапазоне, время, необходимое для достижения стабильного состояния, уменьшается, а реакция на внешние воздействия становится менее выраженной по сравнению с системой без регулятора. Полученные результаты подтверждают перспективность применения H-бесконечности регуляторов в медицинских системах управления метаболическими процессами.

Ключевые слова: биоискусственная печень, моделирование, глюкоза, инсулин, робастность, неопределенность, H-бесконечность регулятор, метод оптимального управления, устойчивость, эффективность.

Введение

Сахарный диабет и печеночная недостаточность относятся к числу наиболее распространенных хронических заболеваний, существенно влияющих на качество и продолжительность жизни пациентов. Ключевой проблемой при их сочетании является нарушение гомеостаза глюкозы, обусловленное как недостаточностью инсулярного аппарата, так и снижением метаболической функции печени. Традиционные методы инсулинотерапии не всегда позволяют достичь устойчивой компенсации углеводного обмена ввиду высокой вариабельности физиологических параметров и отсутствия обратной связи по фактическому состоянию пациента [1].

Биоискусственная печень представляет собой биоинженерную систему, способную выполнять детоксикационную, синтетическую и метаболическую функции, аналогичные естественной печени. Интеграция такой системы с контуром управления уровнем глюкозы открывает новые возможности для поддержания метаболического гомеостаза у пациентов с терминальными стадиями печеночной недостаточности [2].

Среди современных методов управления динамическими системами особое место занимает H-бесконечность теория. Данный метод дает возможность синтезировать регуляторы, которые обеспечивают робастную устойчивость и заданное качество управления в условиях неопределенности и внешних возмущений [3,4]. Применение H-бесконечность подхода к задачам медицинской инженерии является активно развивающимся направлением, однако его использование для управления биоискусственной печенью в литературе представлено фрагментарно.

Целью настоящей работы является синтез H-бесконечность регулятора для системы стабилизации уровня глюкозы на основе математической модели, учитывающей динамику инсулин-глюкозного обмена, а также оценка эффективности предложенного регулятора методами вычислительного моделирования.

Основная часть

Для описания динамики уровня глюкозы и инсулина в крови используется модифицированная модель Бергмана, широко применяемая в задачах синтеза систем управления [5]. Модель имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{G}(t) = -p_1 G(t) - X(t)G(t) + D(t), \\ \dot{X}(t) = -p_2 X(t) + p_3 I(t), \\ \dot{I}(t) = -n\left(I(t) + I_b\right) + u(t), \end{cases}$$

где:

$G(t)$ — уровень глюкозы в крови (мг/дл);

$X(t)$ — инсулин-зависимая утилизация глюкозы (мин$^{-1}$);

$I(t)$ — концентрация инсулина (мкЕд/мл);

$u(t)$ — скорость введения инсулина (управляющий сигнал);

$D(t)$ — внешние возмущения (поступление глюкозы извне);

p_1, p_2, p_3, n, I_b — параметры модели, определяемые физиологическими характеристиками пациента [6].

Целевой уровень глюкозы обозначается G_{ref}. Ошибка регулирования:

$$e(t) = G(t) - G_{ref}.$$

Управляющая переменная $u(t)$ формируется регулятором на основе доступных измерений $e(t)$. В работе рассматривается задача синтеза регулятора по выходу с обратной связью.

H-бесконечность норма. H-бесконечность норма системы является метрикой, определяющей наибольшее возможное усиление сигнала через систему на всем множестве частот. Данный показатель позволяет оценить устойчивость системы при различных внешних воздействиях на нее.

Робастность. Учитывая неопределенности в модели и внешние возмущения, регуляторы H-бесконечность обеспечивают высокую степень робастности системы, что позволяет ей оставаться стабильной и эффективной даже при изменяющихся условиях.

Устойчивость. Стабильность системы поддерживается благодаря применению H-бесконечноть регуляторов, которые эффективно подавляют внешние возмущения и шумы. Они работают на основе методов оптимального управления. Их цель — это минимизация H-бесконечность нормы для замкнутой системы. Для этого нужно решить мини-максимальную задачу, чтобы впоследствии снизить усиления сигнала. Для разработка таких регуляторов необходимо построить математическую модель системы и решить уравнений Риккати.

Метод. Метод направлен на минимизацию H-бесконечность нормы, чтобы определить максимальный рост возмущений, которые система может нейтрализовать, сохраняя устойчивость. Для использования метода H-бесконечность помимо создания математической модели системы требуется вычислить матрицу передачи системы и установить критерий качества. После этого решить оптимизационную задачу для обеспечения требуемых показателей устойчивости и качества управления.

Биоискусственная печень представляет собой медицинское устройство, предназначенное для временного выполнения функций печени у пациентов с печёночной недостаточностью. Для обеспечения стабильной работы этого устройства необходимо внедрение эффективной системы управления. Применение H-бесконечность регулятора позволит минимизировать влияние внешних воздействий на процесс очистки крови.

Для разработки оптимального регулятора необходимо сначала составить математическую модель, в которой прописать все входные и выходные параметры, влияющие на процесс очистки крови. Далее применить методы матричных вычислений и линейно-матричные неравенства, чтобы внедрить H-бесконечность регулятор в систему биоискусственной печени [7].

Постановка задачи. Система для синтеза регулятора в пространстве состояний включает:

- вектор состояния $x(t) \in \mathbb{R}^n$;
- управляющий сигнал $u(t) \in \mathbb{R}^m$;
- вектор возмущений $w(t) \in \mathbb{R}^q$;
- контролируемый выход $z(t) \in \mathbb{R}^p$;
- измеряемый выход $y(t) \in \mathbb{R}^r$.

Система описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t), \\ z(t) = C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t), \\ y(t) = C_2 x(t) + D_{21} w(t) + D_{22} u(t). \end{cases}$$

Задача H∞-оптимального управления заключается в нахождении регулятора $K(s)$, формирующего сигнал $u = Ky$, такого что:

1. Замкнутая система асимптотически устойчива;
2. H-бесконечность норма передаточной функции от возмущений w к контролируемому выходу z минимальна:

$$\|T_{zw}(s)\|_\infty = \sup \bar{\sigma}\left(T_{zw}(jw)\right) \to min,$$

где $\bar{\sigma}$ — максимальное сингулярное число.

Синтез H∞-регулятора. Синтез выполняется в рамках стандартной схемы $P - K$ с использованием решения уравнений Риккати. Для существования регулятора необходимо выполнение условий регулярности и отсутствия нулей на мнимой оси [8, 9].

Регулятор $K(s)$ имеет вид:

$$K(s) = \begin{bmatrix} A_K & B_K \\ C_K & D_K \end{bmatrix},$$

Где матрицы A_K, B_K, C_K, D_K находятся из решения двух алгебраических уравнений Риккати:

$$A^T X + XA - XB_2 B_2^T X + C_1^T C_1 = 0,$$

$$AY + YA^T - YC_2^T C_2 Y + B_1 B_1^T = 0.$$

Выбор весовых матриц C_1, D_{12} позволяет задать требования к качеству регулирования: ограничение управляющего сигнала, допустимую ошибку слежения и полосу пропускания [10].

Моделирование и анализ результатов

Для оценки эффективности синтезированного регулятора проведено численное моделирование в среде MATLAB. Использовались следующие параметры модели:

$p_1 = 0.031$ мин$^{-1}$, $p_2 = 0.014$ мин$^{-1}$, $p_3 = 1.2*10^{-5}$ мин$^{-1}$;

$n = 0.16$ мин$^{-1}$, $I_b = 12$ мкЕд/мл;

$G_{ref} = 100$ мг/дл;

Начальный уровень глюкозы $G(0) = 80$ мг/дл.

В качестве возмущения моделировалось поступление глюкозы $D(t)$ в виде импульса продолжительностью 10 минут, соответсвующего приему пищи [11].

На рис. 1 представлены графики, характеризующие работу синтезированной системы управления.

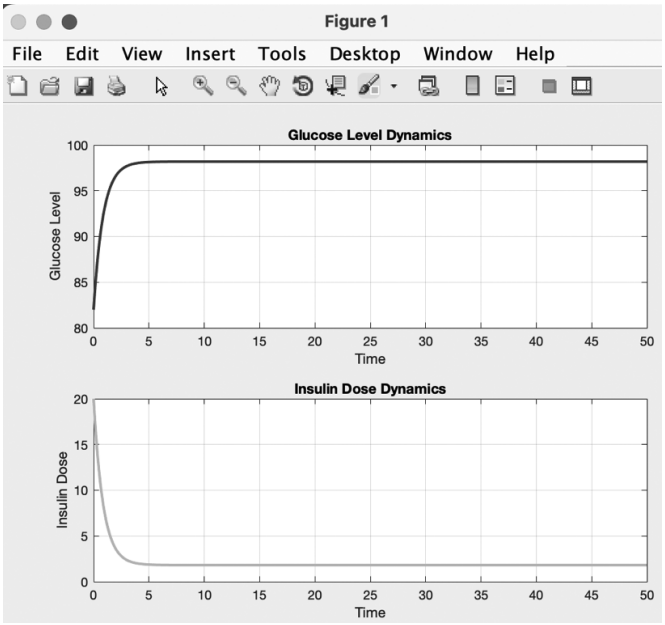


Рис. 1. Динамика уровня глюкозы и дозы инсулина в замкнутой системе с H-бесконечность регулятором

Верхний график отображает изменение уровня глюкозы во времени. В начальный момент времени (t = 0) уровень глюкозы составляет 80 мг/дл, что ниже целевого значения 100 мг/дл. Под действием регулятора формируется управляющий сигнал, и уровень глюкозы плавно возрастает, достигая заданного значения. В установившемся режиме колебания уровня глюкозы не превышают ±2 % от целевого значения, что свидетельствует о высокой точности регулирования.

Нижний график показывает динамику дозы инсулина, подаваемой в систему. В начальный период наблюдается максимальное значение дозы, обусловленное необходимостью быстрой коррекции отклонения уровня глюкозы. По мере приближения глюкозы к целевому уровню доза инсулина снижается и стабилизируется. Видна обратно пропорциональная зависимость между уровнем глюкозы и дозой инсулина: повышение глюкозы приводит к увеличению дозы, и наоборот, что соответствует физиологическому механизму регуляции.

На рис. 2 приведено сравнение динамики уровня глюкозы и дозы инсулина в системе с H-бесконечность

регулятором и без него при одинаковых начальных условиях и возмущениях.

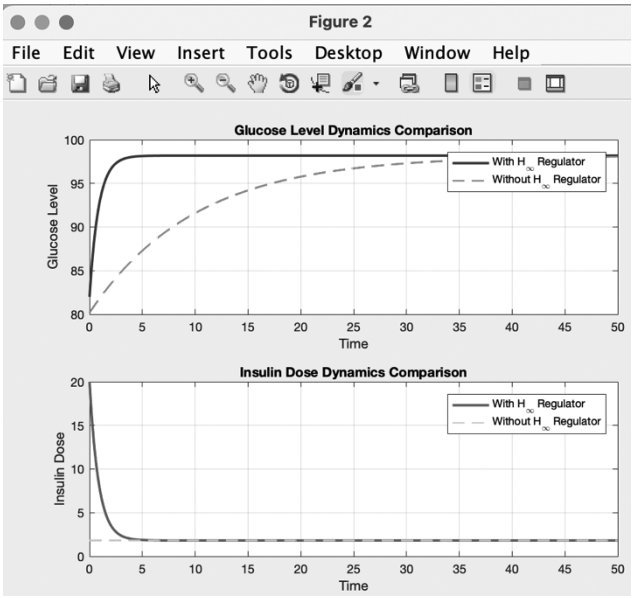


Рис. 2. Сравнение динамики уровня глюкозы и дозы инсулина с регулятором и без регулятора

Верхний график демонстрирует изменение уровня глюкозы. Сплошная серая линия соответствует системе с H∞-регулятором, пунктирная светло-серая — системе без регулятора. В системе с регулятором уровень глюкозы достигает целевого значения быстрее, переходный процесс носит апериодический характер, перерегулирование отсутствует. В системе без регулятора наблюдается затяжной переходный процесс с колебаниями, время выхода на заданный уровень более чем в 2 раза превышает аналогичный показатель для системы с регулятором.

Нижний график показывает динамику дозы инсулина. Сплошная серая линия соответствует системе с H-бесконечность регулятором, пунктирная светло-серая — системе без регулятора. Сравнивая графики, можем заметить, что система с регулятором плавно регулирует дозу инсулина, что позволит избежать гипогликемических состояний. В графике системы без регулятора наблюдаем резкие скачки дозы инсулина, что на практике может привести к нежелательным физиологическим последствиям.

Таким образом, мы продемонстрировали наглядно, что применение регулятора H-бесконечность позволяет стабилизировать систему, способствуя поддержанию уровня глюкозы в заданных пределах.

Вывод

В работе представлена и рассмотрена система автоматического регулирования уровня глюкозы в крови с использованием биоискусственной печени и H-бесконечность регулятора. Результаты численного моделирования подтвердили, что использование H∞-регулятора существенно снижает влияние внешних возмущений на систему и помогает сохранять уровень глюкозы в заданных границах. Система демонстрирует способность адаптироваться к индивидуальным особенностям пациента, что повышает её ценность для практического применения в создании устройств заместительной терапии.

Полученные данные свидетельствуют о потенциале дальнейшего развития и совершенствования данного метода для использования в клинических условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gadewadikar J., Lewis F.L., Abu-Khalaf M. Necessary and Sufficient Conditions for H-infinity Static Output-Feedback Control // Journal of Guidance, Control and Dynamica. 2006. № 4(29). P. 915–920.
2. Wo S., Shi G., Zou Y. Robust H-infinity control for discrete-time singular systems with time-delay and nonlinear perturbatioan // Xi Tong Gong Cheng Yu Dian Zi Ji Shu/Systems Engineering and Electronics. 2009. T. 31(4). P. 916–921.
3. Xu S., Lam J., Yang C. Robust H∞ control for discrete singular systems with state delay and parameter uncertainty // Dynamics Continuous Discrete Impul. Systems. 2002. № 11. P. 497–506.
4. Nakao M., Nakayama N., Uchida Y. Nationwide survey for acute liver failure and late-onset hepatic failure in Japan // J. Gastroenterol. 2017. T. 53(6). P. 752–769.
5. Court F.G., Wemyss-Holden S.A., Dennison, A.R. Bioartificial liver support devices: Historical perspectives // ANZ J Surg. 2003.T. 73. P. 739–748.
6. Alves L.A., Bonavita A., Quaresma K., Torres, E. New Strategies for Acute Liver Failure: Focus on Xenotransplantation Therapy // Cell Medicine, Part B of Cell Transplantation. 2010. V. 1, P. 47–54.
7. Пантелеев А.В., Яковлева А.А. Синтез H-inf регуляторов на конечном промежутке времени // Моделирование и анализ данных. 2021. Т. 11. № 1. С. 5–19.
8. Тарарыкин С.В., Тютиков В.В. Робастное модальное управление динамическими системами // Автоматика и телемеханика. 2002. №5. С. 41–55.
9. Ren S., Irudayam J.I. Bioartificial Liver Device Based on Induced Pluripotent Stem Cell-Derived Hepatocytes // J Stem Cell Res Ther. 2015. №. 5(263).
10. Koivusalo A.M., Teikari T., Hockerstedt K., Isoniemi H. Albumin dialysis has a favorable effect on amino acid profile in hepatic encephalopathy // Metab Brain Dis. 2008. T. 23(4). P. 387–398.
11. Mohammed Y., Verhey J.F. A finite element method model to simulate laser interstitial thermo therapy in anatomical inhomogeneous regions // Biomed Eng Online. 2005. V. 4(2).

© Ганьшин Алексей Сергеевич (1042210064@rudn.ru); Андриков Денис Анатольевич (andrikov-da@rudn.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.13

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ ПОИСКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ НОВЫХ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ (НА ПРИМЕРЕ НЕСТЕРОИДНЫХ ПРОТИВОВОСПАЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ)

USE OF MACHINE CLUSTERING METHODS FOR SEARCH AND FORECASTING OF NEW NON-STEROID ANTI-INFLAMMATORY AGENTS

A. Zhangeriev
A. Shapsigov
S. Zhangeriev

Summary. Non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) are the main means of symptomatic therapy for rheumatic diseases. There is no «ideal» NSAID that has a significant anti-inflammatory effect and no side effects. In this regard, it is important to continue working on creating new, safer representatives of this drug group. The existing approaches to the synthesis of NSAIDs, as well as to the synthesis of representatives of any other group of medical drugs, are largely «blind» — by searching for new synthesized compounds using combinatorial libraries. The paper proposes to streamline this process by using computer clustering methods, such as k-means, to identify centroids corresponding to new chemical molecules in pharmaceuticals.This makes it possible to systematize and determine the direction of the search, which is dictated by the neural network, a powerful tool for discovering knowledge that structures chaotic data and allows us to find hidden logic where only randomness is visible to the naked eye.

Keywords: non-steroidal anti-inflammatory drugs, clustering, k-means method.

Жангериев Аслангери Юрьевич
К.э.н., доцент, Кабардино-Балкарский Государственный университет им Х.М. Бербекова
cmiub@mail.ru
Шапсигов Альберт Хусенович
Кабардино-Балкарский Государственный университет им Х.М. Бербекова
a.shapsigov@kbsu.ru
Жангериев Султан Аслангериевич
Аспирант, Кабардино-Балкарский Государственный университет им Х.М. Бербекова
szhangeriev@mail.ru

Аннотация. Нестероидные противовоспалительные средства (НПВС) — основное средство симптоматической терапии при ревматических заболеваниях. Не существует «идеального» НПВС, имеющего значительный противовоспалительный эффект и отсутствующие побочные явления. В этой связи важно продолжить работу по созданию новых, более безопасных представителей этой лекарственной группы. Существующие подходы к синтезу НПВС, как и к синтезу представителей любых других групп медицинских препаратов, проводятся во многом «вслепую» — перебором новых синтезированных соединений с использованием комбинаторных библиотек. В работе предлагается упорядочить этот процесс, привлечь возможности компьютерной кластеризации методом k-means с определением центроидов, соответствующих новым химическим молекулам лекарственных препаратов. Тем самым появляется возможность систематизации, определения направления поиска, которое диктуется нейросетью — мощным инструментом обнаружения знаний, структурирующим хаотичные данные и позволяющим обнаруживать скрытую логику там, где невооруженным глазом видится лишь случайность.

Ключевые слова: нестероидные противовоспалительные средства, кластеризация, метод k-means.

Введение

Синтез новых, более эффективных и безопасных нестероидных противовоспалительных средств (НПВС) — приоритетное направление современной медицинской химической науки. На первый взгляд, уже имеющееся немалое количество лекарственных препаратов данного класса должно было удовлетворить все потребности человечества в ингибировании синтеза простогландинов и тромбоксанов, возникающих в зоне воспаления.

На сегодняшний день авторам известны, как минимум 133 лекарственных препаратов группы НПВС (с учетом снятых с производства, экспериментальных и применяемых в ветеринарии) объединенных в 8 основных групп (пиразолоны, пиразолидины, салицилаты, производные уксусной кислоты, оксикамы, профены или производные пропионовой кислоты, фенаматы, коксибы, прочие).

Однако по-прежнему остро стоит вопрос разработки «универсальных» НПВС, характеризующихся с одной

стороны высокой эффективностью и избирательностью в отношении ЦОГ-2, с другой — низкими побочными явлениями.

С 1899 года, когда компания «Байер» создала ацетилсалициловую кислоту и назвала препарат «Аспирин» известно, что сначала он был открыт путем перебора перечня ацетилированных органических соединений в качестве возможных новых лекарственных препаратов, т.е. в общем то случайно. Механизм противовоспалительного действия аспирина был неизвестен в период расцвета этого препарата в начале и середине двадцатого века. Считалось, что данный препарат имеет присущие ему свойства путем воздействия на центральную нервную систему, что, несомненно, ошибочно. И только в 1971 году Джон Вейн предположил, что аспирин подавляет выделение неопознанного химического вещества (простогландина)[1].

В настоящее время предполагается, что аспирин блокирует доступ арахидоновой кислоты к своему рецептору и подавляет выработку тромбоксана А2 путем ацетилирования остатка серина вблизи узкого каталитического участка канала ЦОГ-1 [2].

Ингибирование активности ЦОГ-1 и ЦОГ-2 аспирином объясняется ковалентной модификацией остатков серина (Ser 530 в ЦОГ-1 и Ser 516 в ЦОГ-2). Ацетилирование этих боковых гидроксильных групп приводит к необратимому ингибированию посредством стерической блокады активного центра [3].

Также установлено, что аспирин ингибирует экспрессию гена фактора некроза опухолей (ФНО-а). Он среди других эффектов активирует нейтрофилы и макрофаги, которые могут поддерживать воспаление. Терапевтическое действие аспирина на воспаление объясняется липоксином (ЛХ) А4 (тригидроэйкозотетраеновая кислота). Его генерируют разные типы клеток, в том числе активные участники воспалительного процесса нейтрофилы и макрофаги. Пусковым моментом в индукции синтеза (ЛХ) А4 является ацетилирование ЦОГ аспирином [4].

Все эти гипотезы касаются механизма действия одного из самых простейших и давно известных препаратов — ацетилсалициловой кислоты, лечебным действием которого пользовались еще неандартальцы [5].

Что же говорить об исследовании молекулярного взаимодействия более сложных НПВС (например Флоктафенина), рисунок 1:

Несмотря на достигнутый современной наукой уровень вычислительной мощности для компьютерной химии, исследования механизма действия лекарственных препаратов остаются сложнейшей задачей. Для теоре-

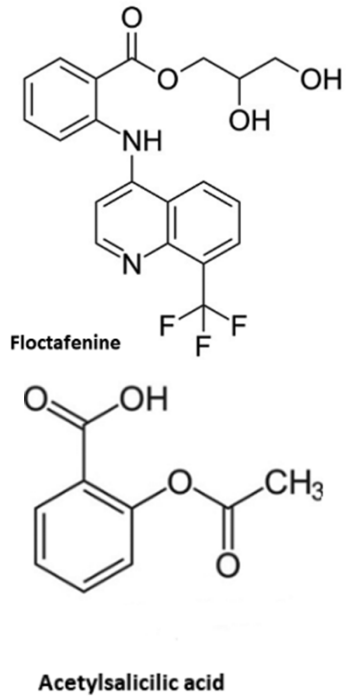


Рис. 1. Сравнение формул флоктафенина (молярная масса 406,4 г/моль) и ацетилсалициловой кислоты (молярная масса 180,2 г/моль)

тического описания механизма их действия требуется расчёт большого количества параметров (включающей препарат, субстрат, молекулы растворителя, ионы и т. д.) и корректное описание биохимической реакции, а также метод Монте-Карло для выборки (как вариант).

Известно, например, что попытка смоделировать взаимодействие молекулы пенициллина при помощи компьютера сталкивается с громадными трудностями. Для такой модели потребовалось бы 10 в 86 степени бит компьютерной памяти — намного больше, чем может позволить себе любой цифровой компьютер [6]. Добавим лишь, что указанное количество памяти намного больше, чем общий объем всех выпущенных человечеством жестких накопителей.

По данным Н. Флинна, процесс открытия новых лекарств представляет собой задачу поиска пересечения химического пространства 10 в 63 степени химических молекул и биологического пространства 100000 человеческих белков. При этом экспериментальное тестирование 10 в 63 степени соединений потребовало бы как минимум 2.7 * 10 в 9 степени лет. Основное ценностное предложение машинного обучения (ML) заключается в автоматизации открытия лекарств с помощью вычислений, что дает нам шанс против иначе неразрешимого химического и биологического пространства поиска [7].

Таким образом, прямое пошаговое моделирование взаимодействия молекул лекарственных препаратов

с белковыми организмами невозможно, по крайней мере, пока не будут широко применяться квантовые вычислительные инструменты.

Масштабирование квантовых компьютеров открывает путь для моделирования химических систем, которые могут позволить исследователям проводить виртуальные эксперименты и обнаруживать новые молекулы гораздо быстрее без проведения физических экспериментов в лаборатории [8].

Можно привести и множество других примеров исследований, в которых доказывается, что на сегодняшний день человечество не располагает действенными инструментами прямого моделирования взаимодействия лекарственных субстанций с белковыми молекулами. Т.е. лекарства, которыми пользуется современная медицина были найдены случайно и находятся, скажем так, «на поверхности» всего разнообразия химических молекул.

Об этом свидетельствует и т.н. «закон Эрума» [9] — разработка лекарств со временем становится всё более медленной и дорогостоящей, несмотря на усовершенствования в технологиях (таких как эффективный скрининг, комбинаторная химия и вычислительное моделирование лекарств). Все найденные на «поверхности» действующие молекулы уже, возможно, известны и требуется поиск иных, ранее не исследованных, соединений.

С 80-х годов прошлого века для поиска новых лекарств фармацевтические компании используют комбинаторные библиотеки — множество молекул со сходной структурой. Современная комбинаторная библиотека содержит около 100 тысяч образцов, анализ проводят роботы, но эффективность поиска невысока: в среднем при скрининге 15 библиотек удается отобрать одно активное вещество. Специалисты мечтают о создании библиотеки из миллиона молекул, однако такое удовольствие обойдется уже в миллиарды долларов. Ни одна фармакологическая компания пока не может себе позволить таких трат [10].

Существующие виртуальные библиотеки имеют в своем распоряжении еще больше химических соединений: виртуальная библиотека CH/PMUNK состоит из 95 миллионов соединений, перечисленных с использованием распространенных реакций из комбинаторной химии. Виртуальная библиотека REAL имеет более 6×10^9 молекул для виртуального скрининга, библиотека малых молекул GDB-17 содержит 160 миллиардов виртуальных соединений, содержащих до 17 тяжелых атомов, библиотека ZINC — база данных, содержащая 1,4 миллиарда соединений [11].

В 1929 году Поль Дирак писал: «основные физические законы, необходимые для математической теории большой части физики и всей химии, полностью известны, и трудность состоит только в том, что точное применение этих законов приводит к уравнениям, слишком сложным для решения. Поэтому становится желательным, чтобы были разработаны приблизительные практические методы применения квантовой механики, которые могут привести к объяснению основных особенностей сложных атомных систем без слишком большого количества вычислений» [12].

На сегодняшний день к таким практическим методам можно отнести инструменты искусственного интеллекта. Существует ряд исследований по этой тематике. Например, в исследовании [13] используются две нейронные сети глубокого обучения — генеративная и предиктивная, — которые обучаются отдельно, но используются совместно для создания новых целевых химических библиотек.

В работе [14] используется обученный многослойный персептрон совместно с автоэнкодером для предсказания свойств каждой молекулы.

В обзоре [15] приведены результаты прогресса в машинном обучении для химических наук, описаны методы машинного обучения, которые подходят для решения исследовательских вопросов в области проектирования, синтеза и применения молекул и материалов, разработанных искусственным интеллектом.

В исследовании [16] доказано, что 3D QSAR модели превосходят традиционные QSAR модели, построенные на основе 2D дескрипторов. Основной проблемой при построении моделей с использованием 3D дескрипторов является выбор правильной предполагаемой биологически активной конформации, что влияет на предсказательную способность моделей.

В работе [17] утверждается, что малые молекулы, как правило, демонстрируют сниженную синтетическую сложность, для некоторых лекарственных препаратов требуются более крупные молекулы. Это ограничивает использование многих генеративных алгоритмов, поскольку некоторые из них способны генерировать только очень маленькие молекулы, так как вычислительные затраты на кодирование и декодирование молекулярных структур, представленных в 3D или в виде квантовых систем, могут быть слишком велики при работе с большими молекулами.

Человеческий разум пока не в состоянии понимать механизмы реакции лекарственных препаратов с белковыми веществами. Как утверждал Нобелевский лауреат Р.Ф. Фейнман «Квантовая электродинамика дает

совершенно абсурдное с точки зрения здравого смысла описание Природы. И оно полностью соответствует эксперименту. Так что я надеюсь, что вы сможете принять природу такой, как Она есть — абсурдной» [18].

Результаты

На сегодняшний день, одним из методов поиска новых лекарственных препаратов может служить компьютерная кластеризация пространственных форм молекул действующих и перспективных химических соединений.

Кластеризация представляет собой способ мышления, позволяющий обнаруживать скрытую логику там, где невооруженным глазом видится лишь случайность. Её фундаментальный принцип — поиск скрытой структуры в хаосе данных — отражает саму суть научного познания [19].

Основной посыл настоящей работы — может быть компьютер увидит те закономерности, которые придают одним химическим соединениям положительные лечебные свойства, а другим соединениям, с подобной (на первый взгляд) химической пространственной структурой совершенно иные, отрицательные или инертные свойства.

Т.е. представив нейросети пространственные химические формулы полезных молекул НПВС попытаемся получить от нее направление синтеза новых, ранее не изученных соединений (как центроиды кластеров).

Для этого химические формулы уже известных лекарственных препаратов группы НПВС были подвергнуты кластеризацией различными методами (за исключением метода DBSCAN). При этом проводилась кластеризация изображений пространственного расположения атомов в молекуле химического соединения, а не кластеризация т.н. «SMILES», которыми оперирует известная библиотека rdkit.

О том, что пространственные изображения химических формул НПВС можно успешно кластеризировать свидетельствует приведенная дендрограмма (использован метод агломеративной кластеризации).

Еще более интересные результаты дает использование инструмента самоорганизующихся карт Кохонена (minisom). Используя его по всему перечню молекул НПВС можно увидеть кластеры.

Взяв за пример группу сходных кластеров (очерчены желтой линией) геометрически находим центр (отмечен четырехконечной звездой) и пытаемся сгенерировать новую молекулу, которая будет ему соответствовать.

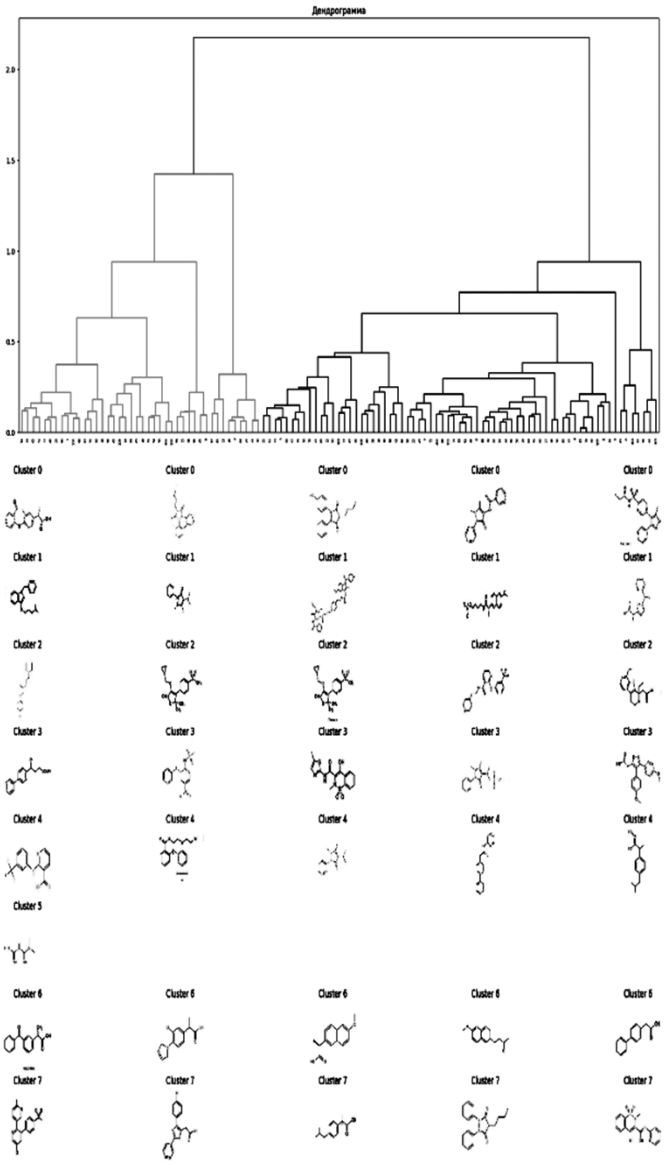


Рис. 2. Дендрограмма процесса агломеративной кластеризации изображений химических формул НПВС

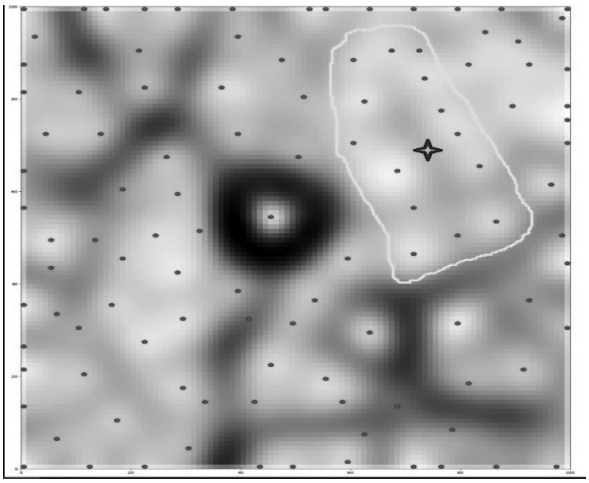


Рис. 3. Результаты кластеризации молекулярных изображений НПВС картой Кохонена

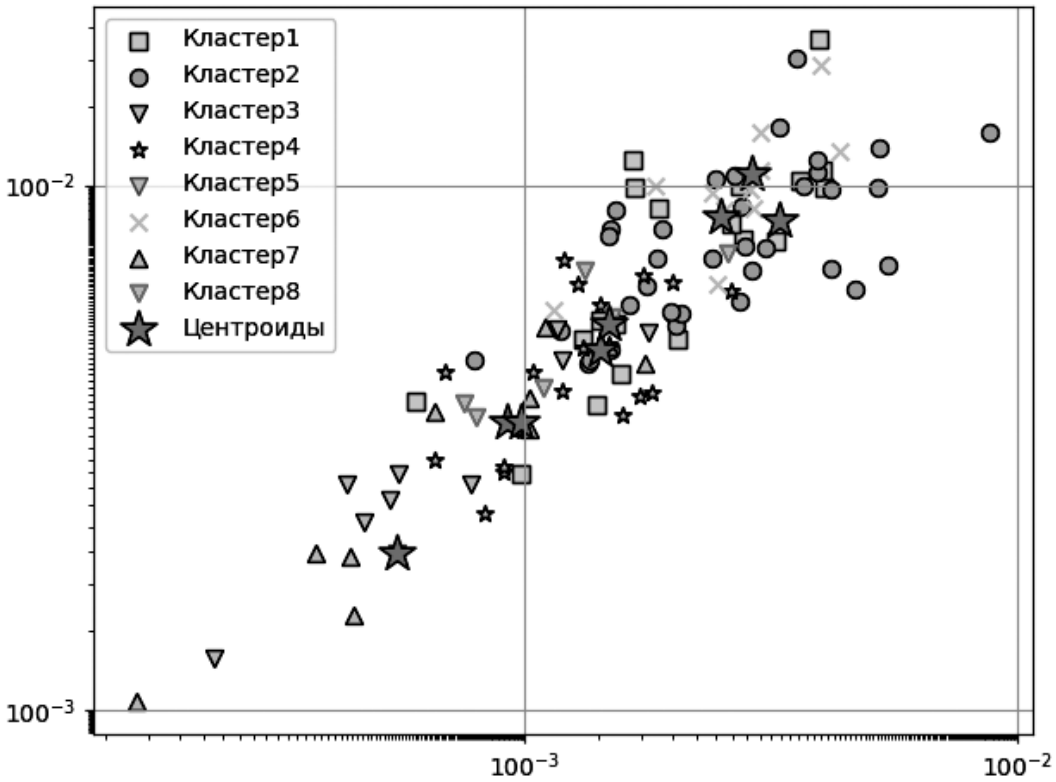


Рис. 4. Результаты кластеризации молекул НПВС методом k-means для определения центроидов кластеров (принудительно задано количество кластеров = 8)

Подобным же образом можно использовать метод k-means для определения центроидов кластеров, к которым необходимо стремиться при генерации новых молекул.

Более правильным будет кластеризировать одновременно не все количество известных молекул НПВС, а отдельные их классы. Ниже приведены результаты кластеризации НПВС класса коксибов методом k-means:

```
Cluster 0:
Фирококсиб.jpg
Рофекоксиб .jpg
Парекоксиб.jpg
Робенакоксиб.jpg
Деракоксиб.jpg
Лумиракоксиб .jpg
Целекоксиб.jpg
Эторикоксиб.jpg
Абрикоксиб.jpg
Вальдекоксиб.jpg
Мавакоксиб.jpg
Цимикоксиб.jpg
```

Рис. 5. Состав пространства входных векторов кластера «Коксибов» для определения центроида

К рассчитанному с точки зрения нейронной сети центроиду (вектору, элементы которого представляют собой средние значения соответствующих признаков, вычисленных по всем записям кластера), надо полагать, соответствует еще не созданное лекарственное средство, имеющее свойства, присущие элементам кластера (являющихся уже известными лекарственными препаратами).

На следующем этапе необходимо виртуально подобрать молекулу нового соединения. При этом молекула кандидата в ходе проверки должна удовлетворять вышеуказанному условию нахождения в области центроида, образованного молекулами уже известных и доказавших эффективность лекарственных препаратов (в этом случае положение «нового» центроида не изменится относительно «старого» или изменится не значительно). Разумеется, указанный подбор потребует немалой вычислительной мощности оборудования, тем не менее, ни идущей ни в какое сравнение с затратами на поиск новых лекарств «слепыми» комбинаторными методами.

Далее предстоит синтезировать молекулу, провести весь комплекс химико-биологических исследований на предмет возможного допуска соединения как лекарственного препарата.

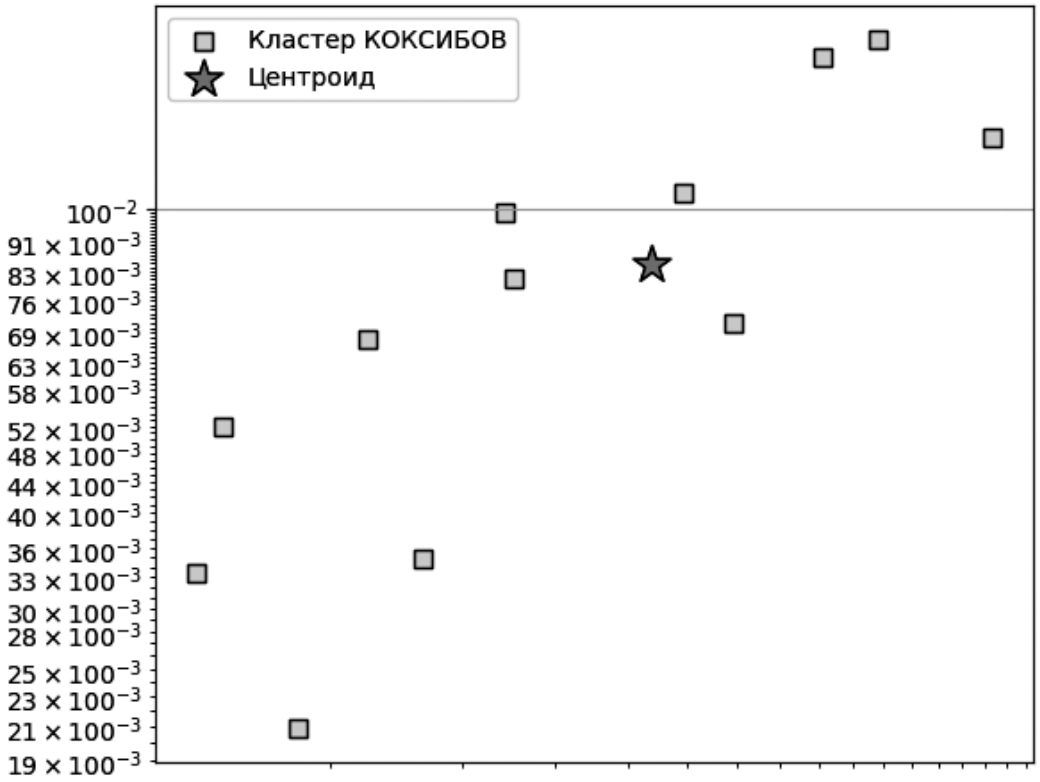


Рис. 6. Результаты кластеризации молекул известных НПВС-коксибов методом k-means для определения центроида

Обсуждение.

Применяя данный алгоритм, мы избавляемся от главной проблемы поиска новых лекарственных соединений — комбинаторных действий «вслепую». Появляется надежда систематизации, определения направления поиска, которое диктуется нейросетью — мощным инструментом обнаружения знаний, структурирующим хаотичные данные и выявляющим скрытые паттерны.

Тем самым, надеемся, частично будет возможно преодолеть главное препятствие вывода на рынок новых лекарственных препаратов — значительные трудовые, материальные и временные затраты на их разработку и доведение до промышленного производства. В настоящее время затраты на вывод одного нового препарата на рынок в среднем составляют от 500 до 800 млн долл., а длительность полного цикла разработки составляет 12–15 лет [20].

Надо полагать, еще более корректные результаты даст кластеризация не двухмерных изображений молекул (как в настоящей работе), а трехмерных структур, которыми оперирует, например, известная запатентованная система конструирования лекарственных препаратов CoMFA [21], что требует дополнительных исследований по этому направлению.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Статья не содержит описания исследований, выполненных кем-либо из авторов, с участием людей или использованием животных в качестве объектов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа проведена на средства КБГУ им Х.М. Бербекова (г. Нальчик).

ЛИТЕРАТУРА

1. Vane J.R. Inhibition of Prostaglandin Synthesis as a Mechanism of Action for Aspirin-like Drugs. Nature New Biology volume 231, pages 232–235 (1971).
2. Jessica L. Mega, Tabassome Simon. Novel antithrombotic agents Pharmacology of antithrombotic drugs: an assessment of oral antiplatelet and anticoagulant treatments. The Lancet. Volume 386, Issue 9990.p281–291 July 18, 2015.
3. Argentina Ornelas, Niki Zacharias-Millward, David G. Menter, Jennifer S. Davis, Lenard Lichtenberger, David Hawke, Ernest Hawk, Eduardo Vilar, Pratip Bhattacharya & Steven Millward. Beyond COX-1: the effects of aspirin on platelet biology and potential mechanisms of chemoprevention. Cancer Metastasis Rev (2017) 36:289–303.
4. Alekhin E.A. Aspirin: The New Life of an Old Medicine. Center for Pharmaeconomic Research. Doi: https://healtheconomics.ru/library/item/ aspirin-novaya-zhizn-starogo-lekarstva/
5. Hatem Tom. The World Before Us: A New Look at the Origin of Humans. Alpina Non-Fiction, 2023, p. 400.
6. Kaku M. Quantum Supremacy: The Revolution in Computing That Will Change Everything; Translated from English. — Moscow: Alpina Non-Fiction, 2024. ISBN 978-5-0022-3430-1. p.175.
7. Noah Flinn. Ной Флинн. Machine Learning for Drug Discover. ISBN9781633437661 c.275. Doi:https://www.manning.com/books/machine-learning-for-drug-discovery?utm_source=flynn&utm_medium=affiliate&utm_campaign=bookflynn_machine_2_29_24&a_aid=flynn&a_bid=ddb44578&chan=mmwebsite
8. Kiper L. Sharkey. Alain Chance. Quantum Chemistry and Quantum Computing with Python Examples. DMK Publishing House. Moscow, 2023, p. 281.
9. Jack W. Scannell, Alex Blanckley, Helen Boldon, Brian Warrington. Джек У. Сканнелл, Алекс Бленкли, Diagnosing the decline in pharmaceutical R&D efficiency. www.nature.com/reviews/drugdisc. MARCH 2012, VOLUME 11. Doi: https://www.nature.com/articles/nrd3681
10. Reznik N.L. Between Poison and Medicine. Chemistry and Life, 2013, No. 3. DOI: https://elementy.ru/nauchno— populyarnaya_biblioteka/431978/Khimiya_i_zhizn_5_2013
11. Simon Viet Johansson, Alexander Schliep, OlaEngkvist, Morteza Haghir Chehreghani. De novo generated combinatorial library design. Digital Discovery,2024,3, 122–135.Doi: https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/dd/d3dd00095h
12. Dirac P. 1929. Quantum Mechanics of Many-Electron Systems. Proc. R. Soc. A 123 : 714–33.
13. Popova M., Isaev A., Tropsha A.Deep reinforcement learning for de novo drug design. Sci Adv.2018,Jul.25;4(7):eaap7885.doi:https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv. aap7885.
14. Rafael Gómez-Bombarelli, Jennifer N. Wei, David Duvenaud, José Miguel Hernández-Lobato, Benjamín Sánchez-Lengeling, Dennis Sheberla, Jorge Aguilera-Iparraguirre, Timothy D. Hirzel, Ryan P. Adams, Alán Aspuru-Guzik. Automatic Chemical Design Using a Data-Driven Continuous Representation of Molecules. ASC central science. 2018, c.268–276.
15. Keith T. Butler, Daniel W. Davies, Hugh Cartwright, Olexandr Isayev. Machine learning for molecular and materials science. Article in Nature · July 2018. doi:https://www.researchgate.net/publication/326608140_Machine_learning_ for_molecular_and_materials_science.
16. Majidov T.I., Zankov D.V., Polishchuk P.G., Nikonenko A., Matveeva M., Varnek A. Multivariate learning for modeling «Structure — property». XXVII Symposium «Bioinformatics and computer design of drugs». Collection of scientific papers.M.2021. doi:https://www.ibmc.msk.ru/external/ BCADD2021.PDF.
17. Dominic D. Martinelli. Generative machine learning for de novo drug discovery: A systematic review. Computers in Biology and Medicine. Volume 145, June 2022, 105403.doi:https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010482522001950?via%3Dihub
18. R. Feynman. QED — a strange theory of light and matter. p.13. Translated from English. M.: Nauka, 1988. p.105.
19. What is Data Clustering: Methods, Principles, and Applications. OAO DPO «Skyeng». Information Article. Doi: https://sky.pro/wiki/analytics/chto-takoe-klasterizatsiya-dannyh-metody-printsipy-i-primenenie/.
20. Korzinov O.V., Balakin K.V., Ivashchenko A.A. Pharmaceutical screening in Russia: direct or reverse?, Center for High Technologies HimRar, Khimki, Moscow Region. Remedium, No. 12, December 2007, pp. 12–17.
21. Kim K.H. Comparative molecular field analysis (CoMFA). Molecular similarity in drug design. Blackie academic & professional. 1995. Chapman & Hall. Doi:https://www.researchgate.net/publication/264544630_Comparative_Molecular_Field_Analysis_CoMFA.

© Жангериев Аслангери Юрьевич (cmiub@mail.ru); Шапсигов Альберт Хусенович (a.shapsigov@kbsu.ru);
Жангериев Султан Аслангериевич (szhangeriev@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.14

ЭЛЕМЕНТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НЕЙРОМОРФНЫХ СТИМУЛЬНО-РЕАКТИВНЫХ BEAM-РОБОТОВ

ELEMENTS OF A MATHEMATICAL MODEL FOR NEUROMORPHIC STIMULUS-REACTIVE BEAM ROBOTS

E. Zholondiyevsky

Summary. BEAM robots perceive the surrounding environment and make decisions based on incoming information and programmed actions, as a result of which they perform movement and carry out manipulations. The main challenge in the miniaturization of most BEAM robots lies in the fact that their control is implemented using microwaves, solar energy, magnetic fields, or acoustic waves. This article examines a general system of neuromorphic formations that communicate with and are interconnected with each other.

Keywords: neural ring circuits, BEAM robot, stimulus-reactive devices, symbiotic robot, neuromorphic devices.

Жолондиевский Эрнесто Робертович
Преподаватель,
ЧОУ ВО «Тольяттинская академия управления»
ambroz220@yandex.ru

Аннотация. BEAM-роботы воспринимают окружающее пространство и принимают решения на основе поступающей информации и запрограммированных действий, вследствие чего они осуществляют движение и выполняют манипуляции. Основная проблема миниатюризации большинства BEAM-роботов заключается в том, что управление ими происходит с использованием микроволн, солнечной энергии, магнитного поля или акустических волн. В данной статье рассматривается общая система нейроморфных формаций, коммуницирующих и сопряженных между собой.

Ключевые слова: нейронные кольцевые цепи, BEAM-робот, стимульно-реактивные устройства, симбиотический робот, нейроморфные устройства.

Введение

Нейроморфные стимульно-реактивные BEAM-роботы представляют собой динамические системы, функционирование которых изменяется во времени и пространстве [9, с. 211]. Параметры таких систем зависят от условий среды и режимов работы, что существенно усложняет математическое описание процессов формирования управляющих сигналов.

Кроме того, BEAM-роботы характеризуются наличием большого числа входных и выходных параметров, многие из которых имеют малые численные значения. Это значительно затрудняет их точное измерение и экспериментальную регистрацию. Вследствие чего получение достоверных данных о функционировании подобных систем, а также о характере их взаимодействия с окружающей средой представляет собой сложную задачу. В связи с этим построение адекватной математической модели, отражающей особенности работы таких устройств, также связано с рядом методологических трудностей [3, с. 1].

Методология

Структура BEAM-робота может быть представлена системой коммуникационных каналов различного уровня (рис. 1).

Коммуникационный канал I уровня обусловлен механико-энергетическим взаимодействием двигателя (чаще коллекторного двигателя постоянного тока, далее — КДПТ) и исполнительного механизма. Он является

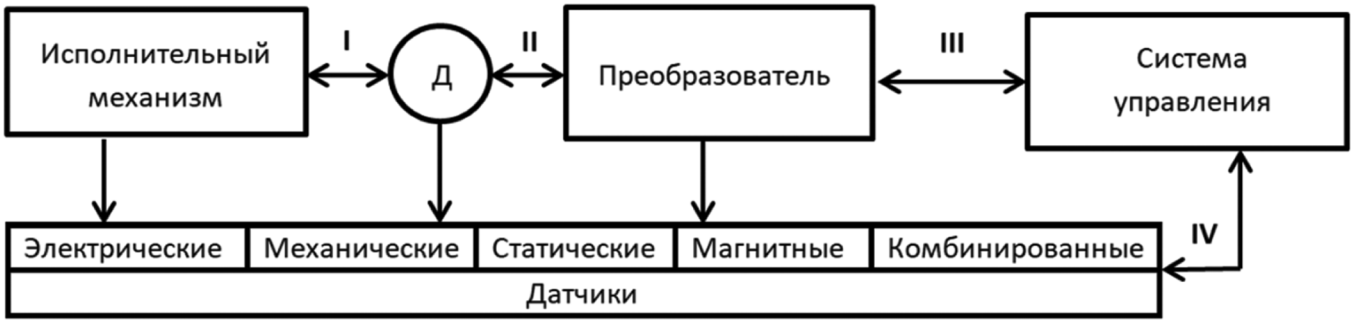


Рис. 1. Структурная схема BEAM-роботов

низкоуровневым элементом согласования электропривода и реализуется посредством механической, гидравлической, электростатической или электромагнитной передачей энергии. Основной функцией коммуникационного канала I уровня является согласование КДПТ и исполнительного механизма с целью достижения максимального коэффициента полезного действия [2, с. 13]. Данные требования обеспечивают связь всех механических характеристик КДПТ и исполнительного механизма в соответствии с математическим выражением:

$$\frac{\Pi_{дин}}{\Delta\omega} = \beta - \beta_c < 0 \quad (1)$$

где $\Pi_{дин}$ — динамический момент КДПТ, Δω — приращение угловой скорости, β и β_c — коэффициенты характеристик жесткости КДПТ и исполнительного механизма.

Коммуникационный канал II уровня служит для подачи на КДПТ электропитания с необходимыми параметрами (к примеру, амплитуды и частоты) напряжения [1, с. 341]. Для регулирования и управления параметрами подаваемого электропитания может использоваться преобразователь. Так как КДПТ является непрерывным нелинейным элементом, а преобразователь — нелинейным дискретным элементом, то появляется целесообразность в организации коммуникационного канала II уровня [4, с. 5]. Данный коммуникационный канал позволяет улучшить энергетические характеристики и динамические параметры привода.

Коммуникационный канал III уровня — топологическое управление и нормализация энергетических параметров. Его организация определяет функциональные и технические возможности привода [5, с. 8].

Коммуникационный канал IV уровня — микро информационно-метрологическая система КДПТ, где диагностируемыми величинами выступают физические величины:

— ток, ЭДС, напряжение;
— перемещение, момент, скорость;
— расстояние, акустика, температура, давление.

Коммуникационный канал IV уровня реализует прием сигналов с измерительных датчиков, их усиление, обработку и последующее импульсно-цифровое или аналого-цифровое преобразование в систему управления. Быстродействие данного коммуникационного канала определяет точность каждой формы модерации и должно быть согласовано с быстродействием коммуникационного канала III уровня. Это обеспечивается принципами детектирования сигналов, структурой обмена и фактической аппаратной реализацией BEAM-робота [6, с. 2].

Результаты и обсуждение

Математические модели представляют собой описание объекта средствами математического языка, т.е. это совокупность математических сущностей (числовых значений, наборов переменных, разноразмерных матриц, различных множеств и т.п.) и связей между ними, отражающих отличительные черты и структуру объекта. Уточняя приведенное выше определение, допустимо определить математическими моделями нейроморфных стимульно-реактивных механизмов BEAM-роботов набор уравнений и формул, характеризующих компоненты и процедуры, возникающие при работе этих механизмов. Таким образом, все параметрические данные нейроморфных стимульно-реактивных механизмов ассоциированы между собой совокупностью математических соотношений. Следовательно математические модели создаются по результатам проведенных исследований. При этом обнаруженные в ходе исследований регулярности отображаются в математических выражениях. Если обозначить вектор выходных предикторов как $Y = (y_1, y_2,\ldots,y_m)$, внутренних параметров — $X = (x_1, x_2,\ldots,x_m)$ и внешних параметров как $Z = (z_1, z_2,...,z_m)$, то можно записать функцию:

$$Y = F(X, Z) \quad (2)$$

Совокупность зависимостей (2) представляет собой обобщенную математическую модель. Преимущественно математическая модель определяется в виде систем математических уравнений, в которых присутствует вектор фазовых предикторов *V*:

$$TV(Q) = f(Q) \quad (3)$$

где *T* является некоторым оператором, *Q* — вектор параметров системы, в общем случае включающий временные и трехмерные пространственные параметры, *f*(*Q*) — заданная функция параметров системы.

Фазовые предикаты описывают физическое или информационно-аналитическое состояние нейроморфного BEAM-робота, а их параметрические преобразования во времени и пространстве — переходные процессы. Главная цель математического моделирования — это определение количественных соотношений между предикатами изучаемого нейроморфного BEAM-робота посредством описания функциональных зависимостей, которые содержатся в математической модели.

Основным манипулятивным элементом нейроморфных стимульно-реактивных механизмов BEAM-роботов является операционный усилитель, входящий в структуру Nv-нейрона, предложенного М.У. Тилденом (рис. 2). Nv-нейрон — элемент нейроморфной цепи, по которой передаются импульсы различного типа, формирующие

осциллирующее выходное напряжение операционных усилителей [8, с. 14].

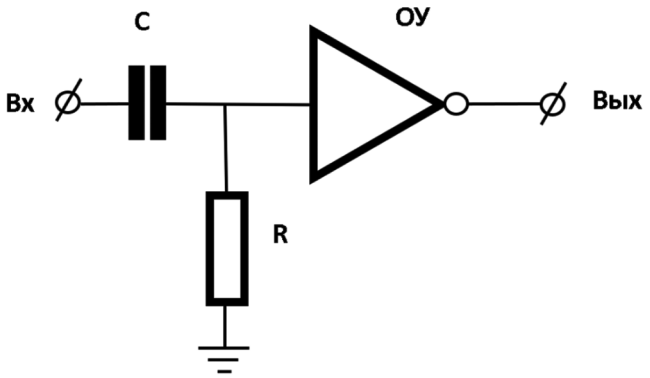


Рис. 2. Nv-нейрон, предложенный М.У. Тилденом

Схема двух Nv-нейронов, объединенных в нейроморфную цепь (рис. 3а), называется двухъядерной. Оба Nv-нейрона формируют кольцевой нейроморфный паттерн, который инициирует осциллирующее выходное напряжение с фазисом, определяемой RC цепочками (номинальными значениями резисторов и конденсаторов).

Суммарная постоянная времени определяется выражением:

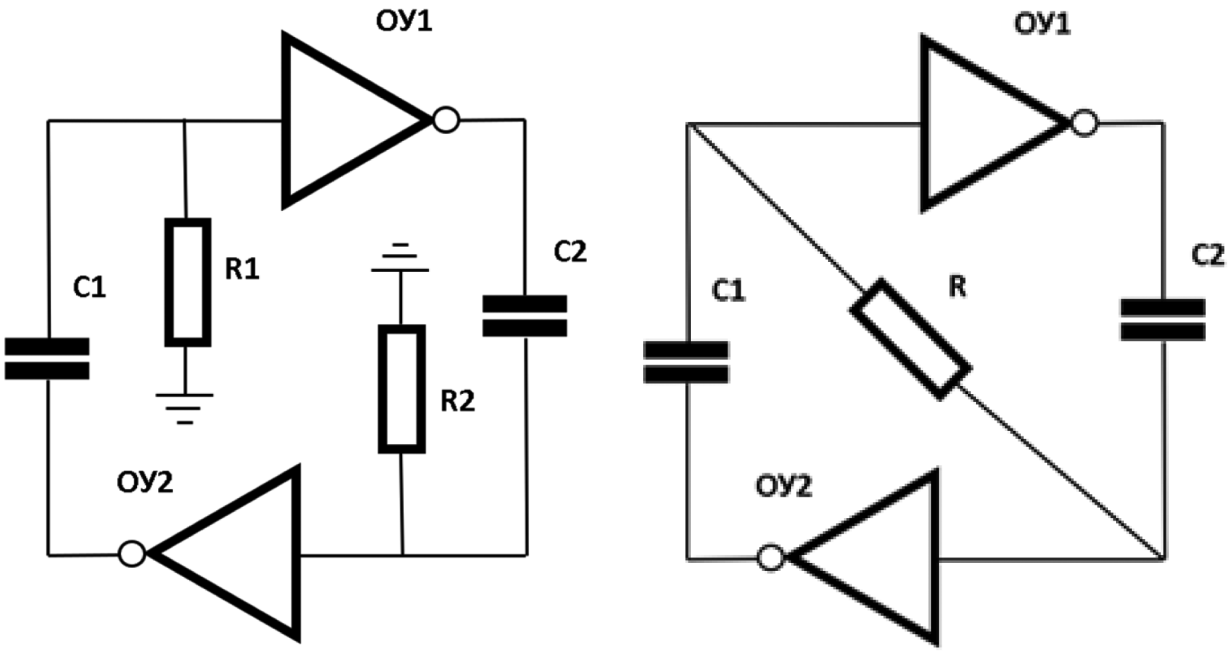
$$\tau_{общ} = \tau_1 + \tau_2 \quad (4)$$

При этом:

$$\tau_i = \alpha * R_i C_i \quad (5)$$

при значениях $i = 1, 2$ τ имеет размерность времени и обусловливается RC цепочкой и номинальными значениями сопротивления и емкости; α — постоянная величина, определяемая параметрами операционного усилителя. Предположим, что емкость используемых конденсаторов одинакова для всех Nv-нейронов. Для изменения временных параметров это не накладывает дополнительных ограничений, поскольку в нейроморфных цепях данного типа необходимо только варьирование номиналов сопротивлений. При этом если номинальные значения R1 = R2, то коэффициент флуктуации составит 50 %, то есть импульсы, проходящие через оба операционных усилителя, будут симметричными [10, с. 4].

Как следует из рис. 3а, резисторы не подключены к общей шине «земля», а объединены между собой и могут рассматриваться как эквивалент одного резистивного элемента. На рис. 3б представлена подвесная нейроморфная двухъядерная схема. В результате формируется симметричная нейроморфная двухъядерная структура. Принцип работы подвесной схемы существенно отличается от функционирования стандартной двухъядерной конфигурации. Для анализа ее работы целесообразно описать протекающие процессы в виде математических соотношений. Ранее колебательные процессы рассматривались через параметры, характеризующие один период колебаний. Для дальнейшего анализа введем обозначения напряжений (рис. 4): V1 и V2 — входное и выходное напряжения операционного усилителя ОУ1, а V3 и V4 — соответственно входное и выходное напряжения операционного усилителя ОУ2.



(а) (б)

Рис. 3. Нейроморфные двухъядерные схемы Nv: а — немодифицированная схема, б — подвесная схема

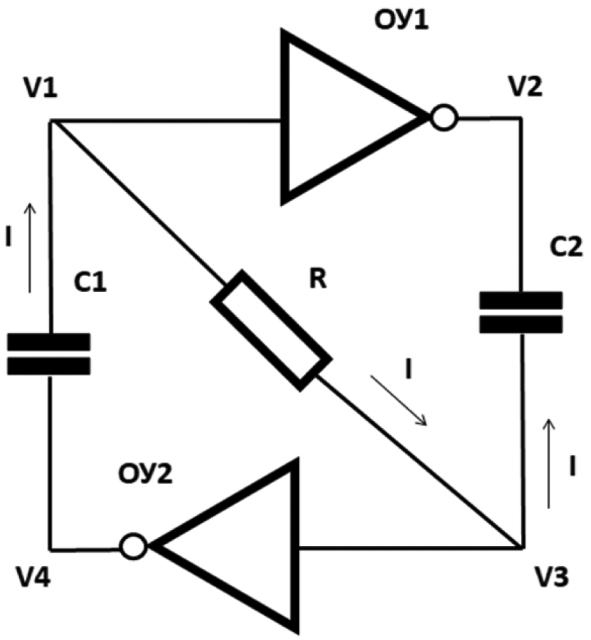


Рис. 4. Обозначения значений напряжений в рассматриваемых точках, направление тока I

Предположим, что в момент времени V1 = 0 В, а V3 = Vcc — номинальное напряжение питания. При прохождении импульса через операционные усилители напряжение в точке V2 равно Vcc, а в точке V4 — 0 В. В этот момент на конденсаторах отсутствует разность потенциалов, тогда как на резисторе R она равна Vcc, в результате чего по цепи протекает ток, заряжающий конденсаторы (рис. 4). Через некоторое время напряжение на резисторе становится близким к нулю, а напряжения в точках V1 и V3 приближаются к пороговому значению операционных усилителей, равному Vcc/2. Один из усилителей начинает изменять свое состояние первым, например ОУ1, при этом напряжение в точке V2 уменьшается от Vcc до 0 В. Вследствие этого напряжение в точке V3 также снижается, поскольку она связана с точкой V2 через конденсатор C2, что приводит к изменению состояния ОУ2. Выход ОУ2, подключенный через C1 ко входу ОУ1, в свою очередь инициирует переключение состояния ОУ1. В результате происходящих процессов напряжения принимают значения V2 = –Vcc/2 и V4 = 3Vcc/2. Однако, если предположить, что операционный усилитель функционирует только в пределах входных напряжений, ограниченных уровнем питания, то V2 = 0 В, а V4 = Vcc (большинство операционных усилителей оснащены защитой от превышения напряжения) [7, с. 321].

Описанный выше процесс осцилляции повторяется, но с противоположными значениями входных и выходных напряжений ОУ1 и ОУ2, и в конце этой последовательности завершится один из периодов осцилляции. Выразим в математических выражениях описанное выше: предположим, что на входах операционных усилителей не протекает ток (входное сопротивление бесконечно большое), а выходное напряжение не зависит от протекающего тока (выходное сопротивление около нуля). В этом случае можно вычислить протекающий ток I, как показано на рис. 4. Для конденсатора отношение между силой тока I_c и напряжением V_c является функцией, в момент времени, и имеет следующее математическое выражение:

$$I_c = C\frac{\partial V_c}{\partial t} \tag{6}$$

Для силы тока I также справедливы следующие математические выражения:

$$I = C_1\frac{\partial V_{left}}{\partial t} \tag{7}$$

где $V_{left} = V_4 - V_1$

$$I = C_2\frac{\partial V_{right}}{\partial t} \tag{8}$$

где $V_{right} = V_2 - V_3$

Для резистора справедлив закон Ома:

$$I = \frac{V_1 - V_3}{R} \tag{9}$$

Для диапазона времени, в течение которого операционные усилители не меняют свое состояние, величину V_{left} допустимо аппроксимировать значением $-V_1$, а V_{right} — значением $-V_3$, учитывая то, что производные V_4 и V_2 в этом диапазоне времени равны нулю. Принимая во внимание допущение, что C1 = C2 = C, и подставив формулу (9) в (7) и (8), получим:

$$-\frac{\partial V_1}{\partial t} = \frac{V_1 - V_3}{RC} \tag{10}$$

$$\frac{\partial V_3}{\partial t} = \frac{V_1 - V_3}{RC} \tag{11}$$

Это ассоциированная система из дифференциальных уравнений I порядка. Если ее преобразовать из первоначального основания $\{V_1; V_3\}$ в новую систему основания $\{V_1+V_3; V_1-V_3\}$, система станет несогласованной:

$$\frac{\partial(V_1 - V_3)}{\partial t} = -2\frac{(V_1 - V_3)}{RC} \tag{12}$$

$$\frac{\partial(V_1 + V_3)}{\partial t} = 0 \tag{13}$$

Данные математические выражения решаются следующим образом:

$$V_1 - V_3 = 2b \times \exp^{\left(-2(t-t_0)/RC\right)} \tag{14}$$

$$V_1 + V_3 = 2a \quad (15)$$

где a и b — константы, а коэффициент 2 добавлен для наглядности, t_0 — момент времени, с которого инициализируется экспоненциальная зависимость. Из (14) и (15) выводим следующие математические выражения для временного диапазона, в течение которого операционные усилители не меняют свое состояние:

$$V_1 = a + b \times \exp^{\left(-2(t-t_0)/RC\right)} \quad (16)$$

$$V_3 = a - b \times \exp^{\left(-2(t-t_0)/RC\right)} \quad (17)$$

Следует понимать, что знак b меняется каждый полупериод из-за вновь появившихся лиминальных условий, определяющих значения a и b. В частности, для идеального операционного усилителя, у которого граничное напряжение составляет Vcc/2 как для положительных, так и для отрицательных областей полупериода, и которое препятствует выходу входного напряжения за пределы, установленные значениями напряжения в диапазоне 0 В и Vcc, a = b = Vcc/2. У подвесной двухъядерной схемы с идеальным операционным усилителем характерна особенность: он не флуктуирует. Экспоненциальные зависимости V_1 и V_3 не достигают порогового напряжения Vcc/2. Это демонстрирует важность учета шумов и неидеальных характеристик элементов схемы. При наложении слабого шума входное напряжение операционного усилителя может превысить пороговое значение, в результате чего схема начинает генерировать колебания. Однако их период не является устойчивым, поскольку процесс определяется случайными шумовыми воздействиями [11, с. 34].

Заключение

BEAM-робототехника — синтетическая и многогранная область современной инженерии. Нейроморфные стимульно-реактивные механизмы требуют междисциплинарной концепции для проектирования инновационных решений, связанных с моделированием стимульно-реактивных механических и нейроморфно-электронных модулей. Более того, исследования в этом направлении предусматривают анализ новых материалов и нанотехнологий в области электропитания, преимущественно при разработке автономных систем. Для стимульно-реактивных нейроморфных BEAM-роботов, используемых в задачах микрометрического координационного позиционирования, методы управления имеют важное значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кацман М.М. Электрические машины / М.М. Кацман. М.: Издательский центр «Академия», 2023. 496 с.
2. Кенио Т. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами: научное издание / Т. Кенио; Пер. с англ. А.Ю. Черкашина. М.: Энергоатомиздат, 1989. 184 с.
3. Brooks R.A. A robust layered control system for a mobile robot. — [Электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: http://beamrobot.ru/library/publishing/A_Robust_Layered_Control_System_For_A_Mobile_Robot_%28Brooks_1985%29.pdf (Дата обращения: 18.12.2025).
4. Brooks R.A. Intelligence without Reason. — [Электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: http://beam-robot.ru/library/publishing/A_Robust_Layered_Control_System_For_A_Mobile_Robot_%28Brooks_1985%29.pdf (Дата обращения: 10.12.25).
5. Tilden M.W. Living Machines. — [Электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: http://beam-robot.ru/library/publishing/Living_machines_%28Tilden_1994%29.pdf (Дата обращения: 17.01.2026).
6. Tilden M. W. The Design of «Living» Biomech Machines: How low can one go? — [Электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: http://beamrobot.ru/library/publishing/The_Design_of_Living_Biomech_Machines_-_How_low_can_one_go_%28Tilden_1997%29.pdf (Дата обращения: 21.01.2026).
7. Козырев Ю.Г. Применение промышленных роботов / Ю.Г. Козырев. Москва: КНОРУС, 2011. 488 с.
8. Лукинов А.П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств / А.П. Лукинов. Санкт-Петербург: Лань, 2012. 608 с.
9. Тимофеев С.И. Теория механизмов и механика машин / С. И. Тимофеев. Ростов-на-Дону: Феникс, 2011. 350 с.
10. Софж Э. Человек и умные запчасти / Э. Софж // Популярная механика. 2012. №7. С. 38–41.
11. Жолондиевский, Э.Р. Датчики, используемые в связанных кольцевых сетях из нейронов Nvc / Э.Р. Жолондиевский // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2016. — № 11. — С. 33–37. — EDN XEASUJ.
12. Жолондиевский, Э.Р. Введение понятий нейроных связанных сетей Nvc в зависимости от датчиков / Э.Р. Жолондиевский // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2016. — № 12. — С. 31–37. — EDN XHWPYX.
13. Жолондиевский, Э.Р. Локомоторная деятельность шагающих BEAM — математическая модель движения в четырех опорных точках / Э.Р. Жолондиевский // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2020. — № 2. — С. 80–82. — EDN IBYDES.

© Жолондиевский Эрнесто Робертович (ambroz220@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.15

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДУЛЯ В ЭКСПЕРТНУЮ СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ ЗПИФ

EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF IMPLEMENTING A NEURAL NETWORK MODULE IN AN EXPERT MANAGEMENT SYSTEM FOR A CLOSED-END MUTUAL FUND

M. Zakaryukin

Summary. This article proposes a methodology for evaluating the effectiveness of implementing a neural network module in an expert management system for a closed-end mutual fund. Unlike approaches that evaluate implementation results primarily based on forecasting accuracy, effectiveness is considered as a multi-criteria characteristic of an organizational system, including recommendation quality, regulatory acceptability, operational effectiveness, resilience to data changes, reproducibility, and auditability of decisions. The methodology is based on a comparison of three configurations — a rule system, a neural network circuit, and a hybrid system — as well as retrospective testing, scenario validation, and a «before/after» evaluation. The scientific novelty lies in the formalization of an integrated performance assessment with threshold conditions for violations of mandatory constraints and the completeness of the decision trace. The practical significance lies in the ability to use the proposed approach when deciding on implementation, verifying the results of the pilot project, and subsequently monitoring the system's performance at a closed-end mutual fund management company.

Keywords: closed-end mutual fund, expert system, neural network module, decision support system, performance assessment, compliance, auditability, model risk management.

Закарюкин Максим Алексеевич
Аспирант, Московский финансово-юридический университет «МФЮА», 29249113@s.mfua.ru

Аннотация. В статье предложена методика оценки эффективности внедрения нейросетевого модуля в экспертную систему управления закрытым паевым инвестиционным фондом. В отличие от подходов, в которых результат внедрения оценивается главным образом по точности прогнозирования, эффективность рассматривается как многокритериальная характеристика организационной системы, включающая качество рекомендаций, нормативную приемлемость, операционную результативность, устойчивость к изменению данных, воспроизводимость и аудируемость решений. Методика опирается на сопоставление трех конфигураций — системы правил, нейросетевого контура и гибридной системы, а также на ретроспективное тестирование, сценарную апробацию и оценку «до/после» внедрения. Научная новизна состоит в формализации интегральной оценки эффективности с пороговыми условиями по нарушениям обязательных ограничений и полноте следа решения. Практическая значимость заключается в возможности использовать предложенный подход при принятии решения о внедрении, верификации результатов пилотного проекта и последующем мониторинге качества функционирования системы в управляющей компании ЗПИФ.

Ключевые слова: закрытый паевой инвестиционный фонд, экспертная система, нейросетевой модуль, система поддержки принятия решений, оценка эффективности, комплаенс, аудируемость, управление модельным риском.

Введение

Управление ЗПИФ представляет собой задачу управления организационной системой, в которой инвестиционное решение формируется не только на основании расчетной оценки альтернатив, но и в результате согласования с нормативными ограничениями, процедурами внутреннего контроля, требованиями специализированного депозитария и ответственностью конкретных участников процесса. [8, 10] Поэтому результат внедрения аналитического модуля должен оцениваться не только по его вычислительным свойствам, но и по тому, как он влияет на весь контур подготовки и утверждения решений.

Для финансового рынка такой подход особенно важен. Банк России в докладах об использовании искусственного интеллекта подчеркивает необходимость управляемости, прозрачности, качества данных и ответственного внедрения интеллектуальных систем. Для управляющей компании ЗПИФ это означает, что нейросетевой модуль не может рассматриваться как изолированный инструмент прогнозирования: он становится элементом организационного механизма, от которого зависят скорость согласования, число ручных доработок, риск нарушения обязательных ограничений и полнота последующего аудита. [2, 4, 7]

В этой связи возникает задача разработки методики оценки результативности внедрения нейросетевого мо-

дуля в уже существующий экспертный контур управления ЗПИФ. Иначе говоря, предметом анализа становится не сама архитектура системы, а критерии, показатели и процедуры, позволяющие судить о том, действительно ли внедрение повышает эффективность управления фондом.

Ключевой тезис статьи состоит в том, что для задач управления ЗПИФ эффективность внедрения нейросетевого модуля должна пониматься шире, чем рост точности прогноза. Она включает качество рекомендаций, соблюдение обязательных ограничений, сокращение времени подготовки решений, снижение нагрузки на экспертный контур, устойчивость к изменению данных, воспроизводимость и аудируемость решений. [1, 3–7, 9]

Цель исследования — разработать методику оценки эффективности внедрения нейросетевого модуля в экспертную систему управления ЗПИФ, пригодную для этапов предварительного обоснования, пилотной апробации и последующего мониторинга.

Научная новизна работы заключается в: 1) представлении эффективности внедрения как многокритериальной характеристики организационной системы; 2) выделении пороговых условий, при нарушении которых конфигурация не может считаться приемлемой независимо от роста точности; 3) формализации интегральной оценки эффективности с учетом нормативной приемлемости, операционной результативности, объяснимости и устойчивости; 4) разработке протокола апробации, сочетающего ретроспективное тестирование, сценарную проверку и оценку до/после внедрения. [5, 8]

Практическая значимость исследования состоит в том, что предложенная методика может использоваться управляющей компанией ЗПИФ при принятии решения о внедрении нейросетевого модуля, сравнении альтернативных конфигураций системы и последующем контроле качества ее функционирования.

Материалы и методы

Объектом исследования является организационно-технический контур принятия решений в управляющей компании ЗПИФ, включающий экспертные процедуры, проверки ограничений, работу специализированного депозитария, контрольные функции и аналитические модули.

Предмет исследования — методы оценки эффективности внедрения нейросетевого модуля в экспертную систему управления ЗПИФ.

Методологическую основу составляют теория управления организационными системами, методы многокритериального анализа, подходы к оценке качества данных и подходы к управлению модельным риском. [4–6, 8] Нормативный контур исследования опирается на Федеральный закон об инвестиционных фондах, акты Банка России, регулирующие деятельность специализированных депозитариев, расчет стоимости чистых активов и процедуры внутреннего контроля.

В качестве базы для апробации методики предполагается использовать обезличенные данные управляющей компании: историю рекомендаций и решений, журналы контроля ограничений, временные метки согласования, данные о фактическом исполнении, сведения о ручных корректировках, отказах, эскалациях и исключениях. Такой набор данных позволяет оценивать не только качество прогноза, но и организационные эффекты внедрения. [1, 4, 5]

В статье используется два взаимодополняющих исследовательских дизайна: сравнение трех конфигураций системы — экспертной системы без нейросетевого модуля, системы с автономным нейросетевым контуром и гибридной системы; а также оценка показателей до и после внедрения нейросетевого модуля в действующий процесс. [1, 3, 5]

Обоснование необходимости отдельной оценки эффективности

В управлении ЗПИФ нейросетевой модуль встраивается не в абстрактную технологическую среду, а в систему, где решение должно быть одновременно экономически обоснованным, допустимым по обязательным ограничениям, воспроизводимым и проверяемым. [8, 10] Поэтому улучшение одной частной характеристики — например, точности ранжирования объектов — еще не означает повышения эффективности всей системы.

Нейросетевой модуль одновременно создает новые возможности и новые риски. К возможностям относятся более гибкое выявление зависимостей в данных, поддержка ранжирования альтернатив и ускорение подготовки рекомендаций. К рискам — деградация качества при изменении распределений данных, снижение интерпретируемости, рост зависимости от качества исходных данных и необходимость сопровождения модели. [4, 6, 9] Для организационной системы значимо не только наличие этих эффектов, но и то, как они влияют на контур управления в целом.

Отсюда следует, что оценка эффективности внедрения должна проводиться по многомерной схеме. Во-первых, необходимо оценивать прогностические свойства нейросетевого модуля. Во-вторых, требуется проверять, улучшает ли его внедрение итоговое каче-

ство решений в допустимой области. В-третьих, необходимо учитывать организационные эффекты: изменение числа ручных корректировок, времени согласования, случаев эскалации и полноты документирования. Наконец, требуется оценивать устойчивость и приемлемость внедрения с точки зрения обязательных ограничений и контроля. [1, 4-7, 9]

Логика сравнения конфигураций

Для оценки эффективности предлагается сравнивать три конфигурации:

1. Конфигурация на основе правил — экспертная система, основанная только на правилах и процедурах.
2. Конфигурация с автономным нейросетевым модулем — вариант, в котором нейросетевой модуль формирует рекомендации без встроенного экспертного контура ограничений.
3. Гибридная конфигурация — вариант, в котором нейросетевой модуль сочетается с системой правил, проверкой обязательных ограничений и процедурами утверждения решения.

Такое сравнение позволяет избежать ложного вывода о пользе внедрения только на основании одной конфигурации. Если сравнивать нейросетевой модуль лишь с отсутствием автоматизации, можно переоценить его эффект. Если сравнивать только гибридную систему с нейросетью без ограничений, можно недооценить роль экспертного контура. Сопоставление трех вариантов дает более корректную картину. [1, 3, 5]

Формализация интегральной оценки эффективности

Пусть K_{pred} — агрегированный показатель качества прогнозирования; K_{dec} — показатель качества управленческих решений; K_{comp} — показатель нормативной приемлемости и качества прохождения обязательных ограничений; K_{org} — показатель операционной результативности; K_{aud} — показатель воспроизводимости и аудируемости; K_{stab} — показатель устойчивости к изменению данных и деградации модели.

Тогда интегральная оценка эффективности конфигурации с может быть задана как

$$E(c) = w_{pred}K_{pred(c)} + w_{dec}K_{dec(c)} + w_{comp}K_{comp(c)} + \\ + w_{org}K_{org(c)} + w_{aud}K_{aud(c)} + w_{stab}K_{stab(c)},$$

где $w_i >= 0$, сумма весов равна 1.

При этом для управления ЗПИФ простая максимизация E(c) без ограничений недостаточна. Необходимы пороговые условия приемлемости. Пусть V(c) — доля нарушений обязательных ограничений, а A(c) — доля решений, для которых отсутствует полный след утверждения и объяснения. Тогда конфигурация считается допустимой только при выполнении условий $V(c) \le V_{max}, A(c) \le A_{max}$ хотя бы одно из этих условий нарушается, конфигурация не может быть признана приемлемой независимо от величины E(c). Это отражает специфику управления ЗПИФ: рост вычислительной эффективности не может компенсировать недопустимость решения или утрату аудируемости. [4, 7, 10]

Для сравнительной оценки внедрения удобно использовать показатель прироста эффективности по отношению к базовой экспертной конфигурации c_0:

$$\Delta E = E(c) - E(c_0).$$

Если $\Delta E > 0$ и одновременно выполняются пороговые условия приемлемости, внедрение может считаться эффективным в рассматриваемом контуре.

Система критериев и показателей эффективности

Данная система критериев позволяет оценивать внедрение нейросетевого модуля не как отдельный технический эксперимент, а как изменение характеристик организационной системы. [1, 4–9]

Ретроспективное тестирование

Первый контур апробации — ретроспективное тестирование на исторических данных. Для каждого временного окна формируются обучающие и тестовые выборки, рассчитываются рекомендации для трех конфигураций, далее сопоставляются показатели всех шести групп критериев. Такой подход позволяет оценить не только среднее качество, но и устойчивость результатов на разных временных срезах. [4, 6]

Чтобы избежать смещения, сравнение должно проводиться по единым сценариям входных данных и единым объектам принятия решения. [5, 6] В противном случае различия между конфигурациями могут быть обусловлены не моделью, а неодинаковой базой наблюдений.

Сценарная апробация

Второй контур — сценарная апробация на типовых и критических управленческих ситуациях. В качестве обязательных сценариев целесообразно использовать: предложение сделки, нарушающей обязательный лимит; изменение оценочной стоимости актива; появление аномального объекта в данных; ухудшение качества входных данных; рост неуверенности модели; случай принятия решения как исключения. [4, 6, 7, 9] В каждом сценарии оцениваются корректность блокировки или

Таблица 1.

Система критериев и показателей эффективности

Группа критериев	Примеры показателей	Тип данных/ источник в контуре управления
Качество прогнозирования	RMSE/MAE по целевым величинам; калибровка вероятностей; качество ранжирования альтернатив	корпоративное хранилище данных; журнал модельных расчетов
Качество управленческих решений	доля решений, требующих повторного согласования; число «исправлений» после контроля; снижение нарушения внутренних лимитов	протоколы решений; замечания контрольных функций; журнал отклонений
Нормативная приемлемость	доля рекомендаций, конфликтующих с обязательными ограничениями; число блокировок на этапе контроля; доля недопустимых предложений	журналы проверок ограничений; протоколы контроля
Операционная результативность	среднее время подготовки решения; среднее число итераций согласования; доля решений, обработанных в стандартный срок	временные метки маршрута согласования; система документооборота
Аудируемость и объяснимость	полнота следа решения; наличие версии модели и данных; доля решений с локальным объяснением	журнал решений; журнал версий; журнал объяснений
Устойчивость и сопровождаемость	признаки дрейфа данных; частота переобучения; стабильность показателей на временных срезах; доля ручных отключений модуля	мониторинг качества модели; журналы сопровождения
Экономический и организационный эффект	снижение трудозатрат экспертов; уменьшение числа повторных рассмотрений; изменение затрат времени на подготовку решения	отчеты подразделений; журналы обработки заявок

перенаправления, сохранение объяснимости и полнота следа решения.

Оценка до и после внедрения

Третий контур — сопоставление показателей организационного процесса до и после внедрения нейросетевого модуля. Здесь анализируются среднее время подготовки решения, число итераций согласования, доля ручных корректировок, частота возвратов на доработку, число нарушений внутренних сроков и полнота документирования. Данный контур особенно важен, поскольку именно он показывает, приводит ли внедрение к изменению управленческой практики, а не только к росту качества модельных расчетов.

Интерпретация результатов

Интерпретация должна строиться по двум уровням. Первый уровень — проверка пороговых условий: если конфигурация не проходит по обязательным ограничениям или аудируемости, она признается неприемлемой. Второй уровень — сравнение интегральной оценки и частных критериев. Это позволяет различать случаи, когда нейросетевой модуль повышает качество прогнозирования, но ухудшает организационную результативность, и случаи, когда гибридная конфигурация дает сбалансированный эффект.

Обсуждение ограничений и условий применимости

Предложенная методика не предполагает универсального набора весов и порогов для всех управляющих компаний. Их значения зависят от структуры фонда, характера активов, внутренних процедур, зрелости данных и роли специализированного депозитария. Тем не менее сама логика многокритериальной оценки с обязательными порогами является переносимой.

Существенным ограничением является качество данных. Если история решений неполна, не ведутся журналы корректировок или отсутствуют временные метки согласования, часть критериев становится трудной для расчета. Это означает, что внедрение нейросетевого модуля должно сопровождаться повышением дисциплины учета и журналирования.

Еще одно ограничение связано с трактовкой эффекта. Даже при статистически значимом росте качества прогнозов реальная полезность внедрения может оказаться низкой, если экспертный контур продолжает систематически переписывать рекомендации модуля или если модель часто выводится в резервный режим. Поэтому оценка эффективности должна интерпретироваться только в контексте организационной практики.

Наконец, предложенная методика ориентирована прежде всего на гибридную систему, а не на полностью автономное применение нейросетевого модуля. Для управления ЗПИФ это принципиально: нейросетевая рекомендация не должна подменять контроль допустимости решения и ответственность органов управления.

Заключение

В статье предложена методика оценки эффективности внедрения нейросетевого модуля в экспертную систему управления ЗПИФ. В отличие от подходов, ори-

ентированных преимущественно на точность прогноза, эффективность рассмотрена как многокритериальная характеристика организационной системы, включающая качество рекомендаций, нормативную приемлемость, операционную результативность, аудируемость и устойчивость. [1, 5, 8]

Научный результат работы состоит в формализации интегральной оценки эффективности с пороговыми условиями по обязательным ограничениям и полноте следа решения, а также в разработке протокола апробации, сочетающего ретроспективное тестирование, сценарную проверку и сопоставление показателей до и после внедрения.

Практическая значимость состоит в том, что методика может использоваться управляющей компанией ЗПИФ для принятия решения о внедрении нейросетевого модуля, выбора конфигурации системы и последующего мониторинга ее качества в рабочем контуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аббасов М.Ш. Применение искусственного интеллекта в системе поддержки принятия управленческих решений // Развитие теории и практики управления социальными и экономическими системами. 2022. № 11. С. 85–89.
2. Грязнов С.А. Влияние искусственного интеллекта на финансовую систему // Научные известия. 2022. Вып. 29. С. 239–241.
3. Карякин В.В. Гибридные интеллектуальные системы как симбиоз естественного и искусственного интеллектов // Россия: тенденции и перспективы развития. 2022. № 17(1). С. 652–655.
4. Кирилюк И.Л. Модельные риски в финансовой сфере в условиях использования искусственного интеллекта и машинного обучения // Russian Journal of Economics and Law. 2022. Т. 16. № 1. С. 40–50.
5. Назарова О.О. Эволюция систем поддержки принятия решений // Дневник науки. 2022. № 3(63). С. 1–7.
6. Намиот Д.Е., Ильюшин Е.А. Мониторинг сдвига данных в моделях машинного обучения // International Journal of Open Information Technologies. 2022. Т. 10. № 12. С. 84–93.
7. Намиот Д., Ильюшин Е., Пилипенко О. Доверенные платформы искусственного интеллекта // International Journal of Open Information Technologies. 2022. Т. 10. № 7. С. 119–127.
8. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. 2-е изд. М.: Физматлит, 2007. 584 с.
9. Райков А.Н. Субъектность объяснимого искусственного интеллекта // Философские науки. 2022. Т. 65. № 1. С. 72–90.
10. Шаймарданов Т.Р., Погодин А.В. Закрытые паевые инвестиционные фонды как способ инвестирования и структурирования активов. Развитие ЗПИФ в России и преимущества в сравнении с другими паевыми инвестиционными фондами // Universum: экономика и юриспруденция. 2022. № 10(97). С. 22–26.

© Закарюкин Максим Алексеевич (29249113@s.mfua.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.16

ГАЛЛЮЦИНАЦИИ ГЕНЕРАТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ ИИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ФИНАНСОВОЙ АНАЛИТИКЕ: ВЫЯВЛЕНИЕ, ОЦЕНКА И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ

HALLUCINATIONS OF GENERATIVE AI MODELS IN AUTOMATED FINANCIAL ANALYTICS: IDENTIFICATION, ASSESSMENT AND PREVENTION

A. Zakirova

Summary. This article is devoted to the study of the problem of hallucinations of generative artificial intelligence models (hereinafter referred to as AI) when using large language models in automated financial analytics tasks. The author pays special attention to improving the reliability of analytical conclusions based on corporate financial reports, as well as developing methods to reduce the likelihood of generating factually incorrect information. The aim of the study is to evaluate the effectiveness of a hybrid approach combining the Retrieval-Augmented Generation (RAG) architecture and structured prompting methods to reduce the level of hallucinations in the analysis of financial data. In the article, the author uses methods of comparative experimental analysis, semantic search based on embeddings, as well as expert qualitative assessment of the generation results. The experiment was conducted on a corpus of financial statements (10-Q) of ten companies from the S&P 500 index for 2024–2025. It includes a comparison of three approaches, namely: a basic query to the language model, using only the RAG architecture, and a hybrid RAG model with advanced manufacturing. The results of the study showed that using a hybrid approach reduces the level of hallucinations from 12 % to 2 %. At the same time, it was revealed that even when using evidence-based search mechanisms, individual data interpretation errors related to temporal or contextual inconsistencies remain possible. As a result of the research, the author came to the conclusion that hybrid architecture is an effective tool for increasing the reliability of generative financial analytics, but its use should be accompanied by expert verification of critical data.

Keywords: hallucinations of generative models, artificial intelligence (AI), automated financial analytics, financial reports, factual accuracy, semantic search, data analysis.

Закирова Алина Равилевна
Московский физико-технический институт
alinazakirovaaa@yandex.ru

Аннотация. Настоящая статья посвящена исследованию проблемы галлюцинаций генеративных моделей искусственного интеллекта (далее по тексту ИИ) при использовании больших языковых моделей в задачах автоматизированной финансовой аналитики. Автором особое внимание уделяется повышению достоверности аналитических выводов, формируемых на основе корпоративных финансовых отчетов, а также разработке методов, позволяющих снизить вероятность генерации фактологически неверной информации. Целью исследования является оценка эффективности гибридного подхода, объединяющего архитектуру Retrieval-Augmented Generation (RAG) и методы структурированного промптинга, для снижения уровня галлюцинаций при анализе финансовых данных. В статье автором применены методы сравнительного экспериментального анализа, семантического поиска на основе эмбеддингов, а также экспертной качественной оценки результатов генерации. Эксперимент проведен на корпусе финансовых отчетов (10-Q) десяти компаний из индекса S&P 500 за 2024–2025 гг. и включает сравнение трех подходов, а именно: базового запроса к языковой модели, использования только RAG-архитектуры и гибридной модели RAG с продвинутым промптингом. Результаты исследования показали, что применение гибридного подхода позволяет снизить уровень галлюцинаций с 12 % до 2 %. При этом выявлено, что даже при использовании механизмов доказательного поиска остаются возможны отдельные ошибки интерпретации данных, связанные с временными или контекстными несоответствиями. В результате исследования, автор пришел к выводу, что гибридная архитектура является эффективным инструментом повышения надежности генеративной финансовой аналитики, однако ее использование должно сопровождаться экспертной верификацией критически важных данных.

Ключевые слова: галлюцинации генеративных моделей, искусственный интеллект (ИИ), автоматизированная финансовая аналитика, финансовые отчеты, фактологическая точность, семантический поиск, анализ данных.

Введение

Генеративные модели искусственного интеллекта, особенно большие языковые модели (Large Language Models, LLM), демонстрируют значительный потенциал в автоматизации задач анализа текстовых данных, включая финансовую аналитику. Они способны обрабатывать большие объемы корпоративной документации, формировать аналитические отчеты и извлекать ключевые показатели из финансовых отчетов компаний.

Однако практическое применение LLM в финансовой сфере осложняется феноменом галлюцинаций, при котором модель генерирует правдоподобные, но фактологически неверные утверждения. Подобные ошибки могут возникать даже при работе с достоверными

источниками данных и представляют существенный риск в областях, где требуется высокая точность информации. Дополнительной проблемой является то, что многие языковые модели функционируют в режиме «черного ящика». Это усложняет выявление, измерение и контроль ошибок, что ограничивает их применение в задачах, связанных с финансовыми решениями.

Таким образом, в контексте вышеизложенного актуализируется потребность в разработке инновационных методологических подходов, направленных на комплексную оптимизацию функционирования когнитивных систем. Эти подходы должны обеспечивать синергетическое снижение вероятности возникновения галлюцинаторных феноменов, одновременно гарантируя верифицируемость генерируемых утверждений и повышая уровень прозрачности операционной деятельности модели.

Научная гипотеза: гибридный подход, сочетающий систему RAG для обеспечения релевантного контекста и верифицируемости с методами структурированного промптинга для контроля над форматом и логикой ответа, обеспечивает статистически значимое снижение уровня галлюцинаций в задачах финансовой аналитики по сравнению с использованием этих методов по отдельности.

Материалы и методы

1. Дизайн исследования

Исследование проводилось как сравнительный анализ трех различных подходов к генерации финансовой аналитики с использованием больших языковых моделей (LLM):

- Контрольная группа (базовый подход): прямой запрос к LLM (DeepSeek) с предоставлением полных текстов PDF-отчетов (10-Q) и простым инструктажем.
- Экспериментальная группа 1 (только RAG): использование кастомной RAG-системы (MultiCompanyFinancialRAG). Система включала семантический поиск на основе эмбеддингов (SentenceTransformer, all-MiniLM-L6-v2) и FAISS индекс. LLM получала только релевантные фрагменты текста с автоматическим цитированием источников.
- Экспериментальная группа 2 (гибридный подход): комбинация RAG-системы и продвинутого промптинга. Промпт предписывал LLM строгую структуру ответа, требовал извлечения конкретных числовых данных, анализа трендов и запрещал экстраполяцию информации, отсутствующей в предоставленных контекстах.

Обоснование выбранного подхода: комбинация RAG и продвинутого промптинга является более воспроизводимой и практически реализуемой в современных условиях, чем дообучение моделей. Данная методология позволяет сделать процесс генерации прозрачным и контролируемым, что критически важно для финансовой аналитики.

2. Набор данных и задачи

Корпус данных: финансовые отчеты (10-Q) 10 компаний из индекса S&P 500 (AAPL, MSFT, GOOGL, META, TSLA, JPM, JNJ, V, WMT, PG) за 2024-2025 гг. Общий объем обработанных документов: 1413 текстовых фрагмента (чанков).

Тестовые запросы: стандартизированный набор из 5 финансовых запросов: revenue and sales performance, gross margin trends, cash flow position, competitors, net income and profitability.

3. Организация:

1. Подготовка инфраструктуры: разработка и обучение RAG-системы (MultiCompanyFinancialRAG) на корпусе финансовых отчетов, создание продвинутого промпта, структурирующего вывод LLM.
2. Проведение эксперимента: генерация ответов на идентичные запросы тремя подходами, фиксация исходных данных для верификации.
3. Верификация и оценка: сравнение с эталонными данными из исходных отчетов.

4. Метрики оценки

Для каждого подхода проводилась двухуровневая оценка:

1. Количественная оценка RAG: system_score (релевантность найденных чанков), sources_found (количество найденных фрагментов).
2. Качественная экспертная оценка ответов LLM:

— Ручная оценка (0-5 баллов): 0 — данные не найдены/нерелевантны, 5 — полный, точный и содержательный ответ.

— Фактологическая точность (бинарный показатель «Галлюцинация?»): фиксировались случаи генерации неподтвержденных данными утверждений.

5. Методы анализа:

1. Сравнительная статистика: расчет средних оценок, частоты галлюцинаций для каждой группы.
2. Качественный анализ: анализ ограничений каждого подхода.
3. Визуализация данных: построение графиков для наглядного сравнения экспериментальных групп.

Инструменты: Python в Colab (библиотеки Pandas, Matplotlib), RAG-система на основе FAISS и SentenceTransformers, Excel для финальной агрегации и визуализации данных.

Результаты

В ходе исследования был проведён сравнительный анализ трех подходов к генерации финансовой аналитики на основе больших языковых моделей: базового запроса к LLM, использования архитектуры Retrieval-Augmented Generation (RAG) и гибридного подхода, объединяющего RAG и структурированный промптинг.

Ключевые результаты

1. Эффективность поиска (RAG-система)
- Система продемонстрировала избирательную эффективность. Запросы, связанные с конкретными финансовыми показателями (gross margin trends, net income and profitability), показывали высокий system_score (0.5–0.63) и находили релевантные данные.
- Выявленная проблема: для 33 % запросов (26 из 78 в manual_evaluation_template (RAG_raw).csv) система не нашла ни одного релевантного источника. Это указывает на «пробелы» в поиске, часто связанные с терминологией.

2. Сравнительный анализ качества ответов LLM

Таблица 1.

Сравнение подходов[1]

Подход	Средняя ручная оценка качества ответа	Уровень галлюцинаций
Базовый (простой запрос)	4.22	12 % (6 из 50 случаев)
Гибридный (RAG + промптинг)	2.02	2 % (1 из 50 случаев)

Базовый подход давал беглые, обобщенные ответы. Критический недостаток — в 12 % случаев (например, для MSFT, GOOGL, JPM, PG) модель генерировала списки конкретных конкурентов, отсутствующие в исходных отчетах, что является классической фактической галлюцинацией (См. Таблицу 1).

Только RAG почти полностью исключил галлюцинации. Однако критическим ограничением «чистой» RAG-архитектуры является отсутствие этапа семантического синтеза. Система выдает набор релевантных текстовых отрезков (чанков) с указанием источников, но эти данные не представлены в виде структурированного, связного аналитического вывода, пригодного для непосредственного использования. Это фундаментально обосновывает необходимость гибридизации RAG с языковыми моделями, где RAG выступает как механизм достоверного поиска, а LLM — как инструмент интерпретации и синтеза финального ответа.

Гибридный подход продемонстрировал синергетический эффект.

1. RAG выступил как фильтр фактов, почти исключив галлюцинации.
2. Структурированный промптинг заставил модель извлекать конкретные числовые данные ($58,275 (2025) vs $54,855 (2024)), анализировать тренды (рост общей маржи на $3,420 млн) и формулировать выводы, основанные исключительно на доказательствах.
3. В случаях отсутствия данных система явно указывала на это, что является признаком высокой надежности.

Гибридный подход показал практически полное отсутствие галлюцинаций (См. Рисунок 1). Однако был зафиксирован один критически важный случай фактической ошибки: Apple Inc. (AAPL), запрос «gross margin trends»: в ответе указаны показатели за 2025 и 2024 годы, в то время как в исходных отчетах (aapl-20241228.pdf, aapl-20250329.pdf, aapl-20250628.pdf) содержались данные за 2025 год и, соответственно, за 2024-й. Модель некорректно сместила временные периоды, представив данные 2025 года как 2024-й, а 2024-го — как 2023-й.

Данный случай не является «придумыванием» данных, но представляет собой фактическую ошибку в интерпретации временных меток, что в финансовой аналитике не менее критично.

Стоит отметить, что гибридный подход демонстрирует компромисс между полнотой и достоверностью. Резкое снижение средней оценки качества (2.02 против 4.22) объясняется не ухудшением работы модели, а принципиальным изменением её поведения: в 46 % случаев система корректно сообщает об отсутствии данных в источниках, вместо того чтобы генерировать правдоподобные галлюцинации (См. Рисунок 2). В контексте финансовой аналитики, где цена ошибки крайне высока, такое поведение является предпочтительным, так как смещает фокус с создания беглых аналитических заметок на обеспечение фактологической чистоты каждого утверждения.

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают, что применение механизмов доказательного поиска существенно повышает надежность генеративных моделей при работе с финансовыми данными. Архитектура RAG позволяет

[1] Составлено автором на основе эмпирически полученных данных.

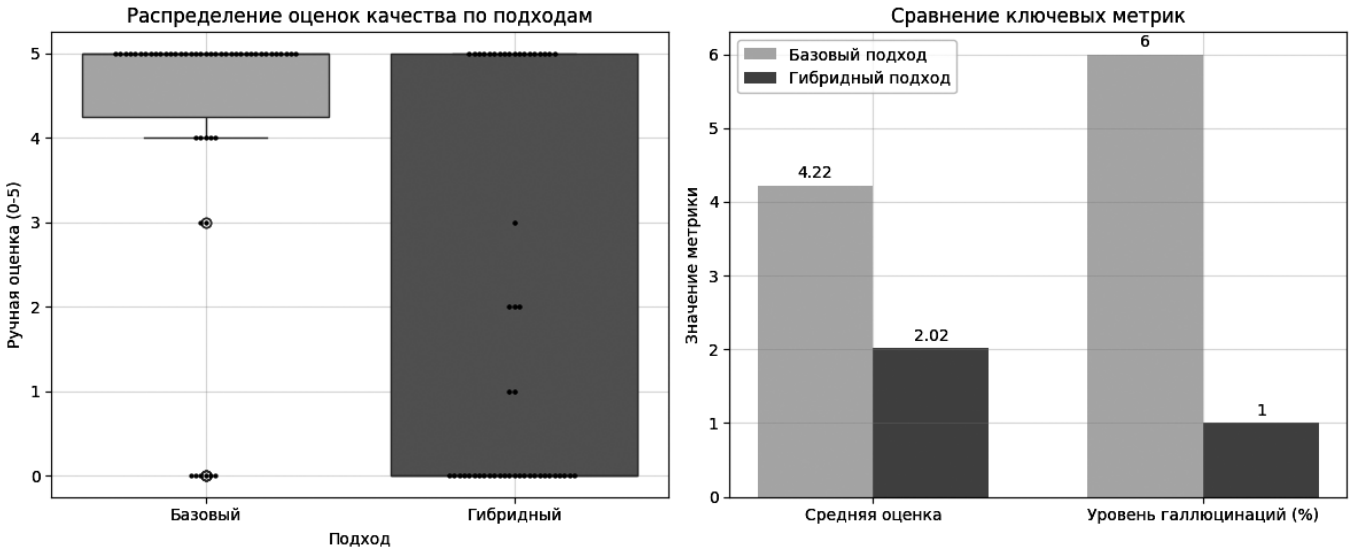


Рис. 1. Сравнение эффективности подходов[2]

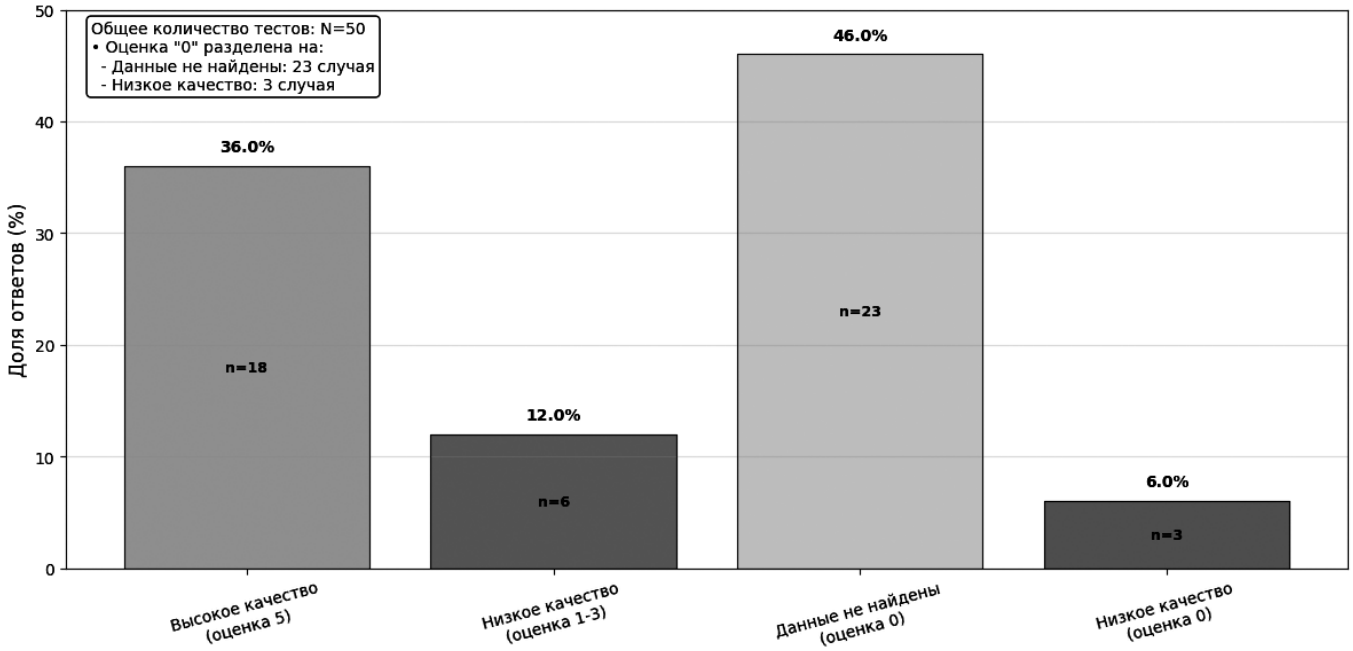


Рис. 2. Структура оценок гибридного подхода (RAG + промптинг)[3]

ограничить контекст модели релевантными фрагментами документов и обеспечивает возможность проверки каждого утверждения через ссылки на источник.

Однако результаты эксперимента показывают, что использование только RAG не решает полностью задачу автоматизированной аналитики. Отсутствие этапа семантического синтеза делает полученные результаты менее пригодными для практического использования, поскольку пользователь получает набор фрагментов текста, а не структурированный аналитический вывод.

Комбинирование RAG с методами структурированного промптинга позволяет преодолеть данное ограничение. В гибридной архитектуре RAG выполняет функцию фильтра достоверных данных, тогда как языковая модель осуществляет их интерпретацию и аналитическое обобщение. Такая комбинация формирует более контролируемую и прозрачную систему генерации.

Тем не менее эксперимент выявил и ограничения данного подхода. В одном из случаев была зафиксирована ошибка интерпретации временных периодов в финансовых данных компании Apple. Несмотря на то, что модель использовала корректные числовые значения из документов, она неверно интерпретировала хронологию отчетных периодов. Данный пример демонстри-

[2] Составлено автором на основе эмпирически полученных данных.

[3] Составлено автором на основе эмпирически полученных данных.

рует, что даже при наличии достоверного контекста остаются возможны семантические ошибки интерпретации информации.

Таким образом, результаты исследования подтверждают необходимость сочетания автоматизированных систем анализа с экспертной проверкой, особенно в областях, где точность данных имеет критическое значение.

Заключение

Настоящее исследование эмпирически подтверждает выдвинутую гипотезу. Так, гибридный подход (RAG + продвинутый промптинг) демонстрирует значительное и статистически существенное снижение уровня галлюцинаций по сравнению с базовым подходом (с 12 % до 2 %). Однако, как показал единичный кейс с Apple, он не обеспечивает абсолютной защиты от всех типов фактологических ошибок.

Доказательство эффективности с определением границ: исследование доказывает, что гибридный подход является наиболее эффективным методом борьбы с галлюцинациями, но также выявляет его пределы надежности. Система успешно фильтрует «вымышленные» факты, но остается уязвимой к семантическим ошибкам интерпретации внутри предоставленного контекста (например, путаница в хронологии).

Важность верификации: выявленный случай подчеркивает, что даже самые продвинутые системы, основанные на RAG, не могут считаться полностью автономными и требуют финальной верификации критически важных данных человеком-экспертом. RAG не отменяет необходимость экспертного контроля, но делает его осуществление более эффективным за счет прозрачности и наличия цитат.

Гибридный подход можно считать оптимальным практическим решением для задач финансовой аналитики, так как он повышает надежность ответов. Снижение общей средней оценки качества является не недостатком метода, а следствием его принципиальной ориентации на достоверность: система предпочитает не дать ответа, чем дать недостоверный. Для критически важных областей, таких как финансовая аналитика, данный компромисс является оптимальным. Однако его внедрение должно сопровождаться пониманием, что система достигает уровня «чрезвычайно низкой вероятности ошибки», а не «абсолютной безошибочности», и для критически важных решений финальная верификация остается необходимой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпенко, И.И. Галлюцинирование генеративного искусственного интеллекта: опасности и их предотвращение / И.И. Карпенко, В.Ю. Меринов // Донецкие чтения 2024: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности : материалы IX Международной научной конференции, Донецк, 15–17 октября 2024 года. — Донецк: Донецкий национальный университет, 2024. — С. 348–350.
2. Розов, К.В. Мини-проекты по программированию при обучении технологиям искусственного интеллекта как противодействие генеративному искусственному интеллекту / К.В. Розов // Дистанционные обучающие технологии в высшем образовании : Материалы XVIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 18 апреля 2025 года. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский гуманитарный университет профсоюзов, 2025. — С. 74–76.
3. Хубиев, А.Р. К вопросу о потенциале искусственного интеллекта, генеративного искусственного интеллекта и технологии блокчейн в гражданском процессе / А.Р. Хубиев // Государственная служба и кадры. — 2024. — № 2. — С. 269–272.
4. Бейненсон, В.А. Применение генеративных нейросетей в журналистике: проблемы и перспективы / В.А. Бейненсон // Динамика медиасистем. — 2023. — Т. 3, № 1. — С. 352–359.
5. Карпенко, И.И. Использование нейросетей в работе региональных СМИ / И.И. Карпенко // Коммуникация в современном мире: Материалы Международной научно-практической конференции исследователей и преподавателей журналистики, рекламы и связей с общественностью, Воронеж, 24 мая 2024 года. — Воронеж: Воронежский государственный университет, 2024. — С. 116–118.
6. Альдасоро И., Гамбакорта Л., Коринек А., Шрити В., Стейн М. Интеллектуальная финансовая система: Как искусственный интеллект трансформирует финансы // Рабочие документы BIS. 2024. № 1194, июнь. https:// www.bis.org/publ/work1194.pdf (дата обращения: 10.08.2025).
7. Альдасоро И., Армантье О., Доерр С., Гамбакорта Л., Оливьеро Т. Данные опроса о поколениях и домохозяйствах: перспективы трудоустройства на фоне проблем с доверием // Бюллетень BIS. 2024. № 86, апрель. https://www.bis.org/publ/bisbull86.pdf (дата обращения: 10.08.2025).
8. Банк международных расчетов (BIS). Искусственный интеллект и экономика: последствия для центральных банков // Ежегодный экономический отчет. 2024. Июнь. стр. 91–127. http://www.bis.org/publ/arpdf/ar2024e3.pdf (дата обращения: 10.08.2025).
9. Базельский комитет по банковскому надзору (BCBS). Цифровизация финансов. 2024. май. https://www.bis.org/bcbs/publ/d575.pdf (дата обращения: 10.08.2025).
10. Белл С.А., Коринек А. Экономическая опасность ИИ // Journal of Democracy. 2023. Том 34. № 4. С. 151–161.

© Закирова Алина Равилевна (alinazakirovaaa@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.19

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНО-ОБУСЛОВЛЕННОЙ ЭМИССИОННОЙ НАГРУЗКИ МЕГАПОЛИСА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА МОСКВЫ)

SPATIOTEMPORAL MODELING OF TRANSPORT-INDUCED EMISSION LOAD IN A METROPOLIS BASED ON MACHINE LEARNING METHODS (CASE STUDY OF MOSCOW)

A. Krivov
A. Martynenko
S. Suvorov

Summary. The paper proposes a spatiotemporal approach to modeling transport-induced emission load in a large city using open air quality monitoring data and road network characteristics. Monthly average NO_2 concentrations from Moscow monitoring stations for 2013–2025 were used as an indicator of transport impact. Spatial features were derived from OpenStreetMap data using the OSMnx library. Linear regression (Ridge) and gradient boosting (LightGBM) models were compared. Including infrastructure features increased R^2 from 0.17 to 0.32, while the nonlinear model achieved $R^2 \approx 0.42$. Sensitivity analysis with respect to buffer radius (300–1000 m) and spatial validation were performed. The results confirm that road network characteristics can serve as proxy indicators of transport emission load under limited availability of detailed traffic data.

Keywords: transport emissions, nitrogen dioxide, spatial analysis, machine learning, gradient boosting, LightGBM, OpenStreetMap.

Кривов Александр Владимирович
Московский политехнический университет
alexander_krivov@mail.ru
Мартыненко Александр Андреевич
Московский политехнический университет
smaklofff@yandex.ru
Суворов Станислав Вадимович
Кандидат экономических наук,
Московский политехнический университет
kafedrapi12@mail.ru

Аннотация. В статье представлен подход к пространственно-временному моделированию транспортно-обусловленной эмиссионной нагрузки крупного города на основе открытых данных мониторинга атмосферного воздуха и характеристик улично-дорожной сети. В качестве индикатора транспортного воздействия использованы среднемесячные концентрации диоксида азота (NO_2) по станциям мониторинга Москвы за период 2013–2025 гг. Пространственные признаки сформированы на основе данных OpenStreetMap с применением библиотеки OSMnx. Проведено сравнение линейной модели (Ridge-регрессия) и ансамблевой модели градиентного бустинга (LightGBM). Показано, что включение инфраструктурных характеристик дорожной сети повышает коэффициент детерминации с 0,17 до 0,32, а использование нелинейной модели обеспечивает достижение $R^2 \approx 0{,}42$. Выполнен анализ устойчивости результатов при изменении радиуса пространственной агрегации (300–1000 м), а также проведена пространственная валидация. Полученные результаты подтверждают возможность использования параметров дорожной инфраструктуры в качестве прокси-показателей транспортной эмиссионной нагрузки в условиях ограниченной доступности детализированных данных о транспортных потоках.

Ключевые слова: транспортные выбросы, диоксид азота, пространственный анализ, машинное обучение, градиентный бустинг, LightGBM, OpenStreetMap.

Введение

Загрязнение атмосферного воздуха остаётся одной из ключевых экологических проблем крупных городов. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, воздействие загрязняющих веществ, в том числе оксидов азота, оказывает существенное влияние на здоровье населения и уровень преждевременной смертности [1]. В условиях высокой плотности застройки и интенсивной транспортной активности мегаполисы характеризуются выраженной пространственной неоднородностью загрязнения.

Диоксид азота (NO_2) рассматривается как один из наиболее репрезентативных индикаторов транспортно-обусловленного загрязнения [1–3]. Вблизи магистралей и транспортных узлов концентрации NO_2, как правило, превышают фоновые значения, что подтверждено многочисленными исследованиями [3–5].

Традиционные подходы к оценке транспортных выбросов основаны на инвентаризационных методах, предполагающих использование эмиссионных коэффициентов и данных о транспортных потоках. Однако детализированные данные об интенсивности движе-

ния зачастую недоступны в открытом пространственно-временном разрезе либо требуют сложной процедуры согласования. Это ограничивает возможности оперативной и масштабируемой оценки транспортно-обусловленной эмиссионной нагрузки.

В последние годы методы машинного обучения активно применяются для прогнозирования концентраций загрязняющих веществ [6–10]. Их преимуществом является способность выявлять нелинейные зависимости и учитывать взаимодействие факторов. Тем не менее в ряде исследований основной акцент делается либо на временных моделях прогнозирования, либо на использовании детализированных данных о трафике, тогда как потенциал характеристик дорожной инфраструктуры как прокси-показателей транспортной нагрузки изучен недостаточно.

Целью настоящей работы является разработка пространственно-временной модели транспортно-обусловленной эмиссионной нагрузки мегаполиса на основе открытых данных мониторинга и параметров улично-дорожной сети.

1. Данные и методика исследования

1. Источники данных

В исследовании использованы:
— данные о среднемесячных концентрациях загрязняющих веществ (набор «Среднемесячные показатели загрязнения атмосферного воздуха») [26];
— данные о расположении автоматических станций контроля загрязнения атмосферы [27].

Данные получены с официального портала открытых данных Правительства Москвы.

В итоговую выборку вошли наблюдения по 48 станциям за период 2013–2025 гг. В качестве целевой переменной выбраны среднемесячные концентрации NO_2.

2. Формирование признаков

Для описания сезонной динамики использовано циклическое кодирование месяца, что позволяет учитывать периодичность годового цикла.

Для кодирования календарного месяца $m \in \{1,\ldots,12\}$ использованы тригонометрические преобразования:

$$month_sin = \sin(2\pi \cdot month/12)$$

$$month_cos = \cos(2\pi \cdot month/12)$$

Данный подход позволяет корректно учитывать циклическую природу сезонности без разрыва между декабрём и январём, что особенно важно при использовании моделей машинного обучения.

Пространственные признаки сформированы на основе дорожной сети, полученной из OpenStreetMap с использованием библиотеки OSMnx [7]. Для каждой станции построены буферные зоны радиусом 300 м, 500 м и 1000 м, в пределах которых рассчитаны:
— суммарная протяжённость дорог;
— суммарная протяжённость магистралей (motorway, trunk, primary).

Таким образом, характеристики инфраструктуры рассматриваются как прокси-переменные потенциальной транспортной нагрузки.

3. Схема валидации

Использовано временное разделение:
1) 2013–2022 гг. — обучение;
2) 2023–2025 гг. — тестирование.

Дополнительно выполнена пространственная валидация (spatial holdout), при которой часть станций полностью исключалась из обучения.

2. Модели

Рассмотрены:
— Ridge-регрессия (линейная модель с L2-регуляризацией);
— LightGBM — ансамблевый метод градиентного бустинга над решающими деревьями [5].

Качество оценивалось по MAE, RMSE и коэффициенту детерминации R^2.

2. Результаты моделирования

1. Сравнение моделей

Результаты обучения моделей представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Сравнение моделей

Модель	MAE	RMSE	R^2
Ridge (baseline)	0.00926	0.01259	0.175
Ridge + инфраструктура	0.00882	0.01139	0.324
LightGBM	0.00807	0.01054	0.423

Добавление инфраструктурных характеристик приводит к увеличению коэффициента детерминации почти в два раза по сравнению с базовой линейной моделью. Это указывает на существенный вклад пространствен-

ной структуры дорожной сети в формирование концентраций NO_2.

Применение градиентного бустинга позволяет дополнительно повысить точность прогноза. Рост R^2 до 0,42 свидетельствует о наличии нелинейных зависимостей между концентрацией загрязняющего вещества и характеристиками транспортной инфраструктуры.



Рис. 1. Сопоставление наблюдаемых и прогнозных значений концентрации NO

Диаграмма рассеяния демонстрирует отсутствие выраженной систематической ошибки и приемлемое соответствие предсказанных и наблюдаемых значений.

2. Чувствительность к масштабу пространственной агрегации

Для оценки устойчивости результатов выполнено моделирование при различных радиусах буферной зоны. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Зависимость качества модели LightGBM от радиуса пространственного буфера

Радиус	R^2
300 м	0.422641
500 м	0.422953
1000 м	0.422935

Незначительное снижение R^2 при увеличении радиуса свидетельствует о локальном характере влияния дорожной инфраструктуры. Максимальное качество достигается при радиусе 300 м, что согласуется с представлениями о локализованном воздействии автотранспорта.

3. Анализ важности признаков

Оценка значимости факторов в модели LightGBM показала, что наибольший вклад вносят:

— географические координаты станции,
— сезонные компоненты,
— суммарная протяжённость дорог,
— протяжённость магистралей.

Добавление инфраструктурных признаков позволило увеличить коэффициент детерминации линейной модели с 0.175 до 0.324, что подтверждает значимость про-

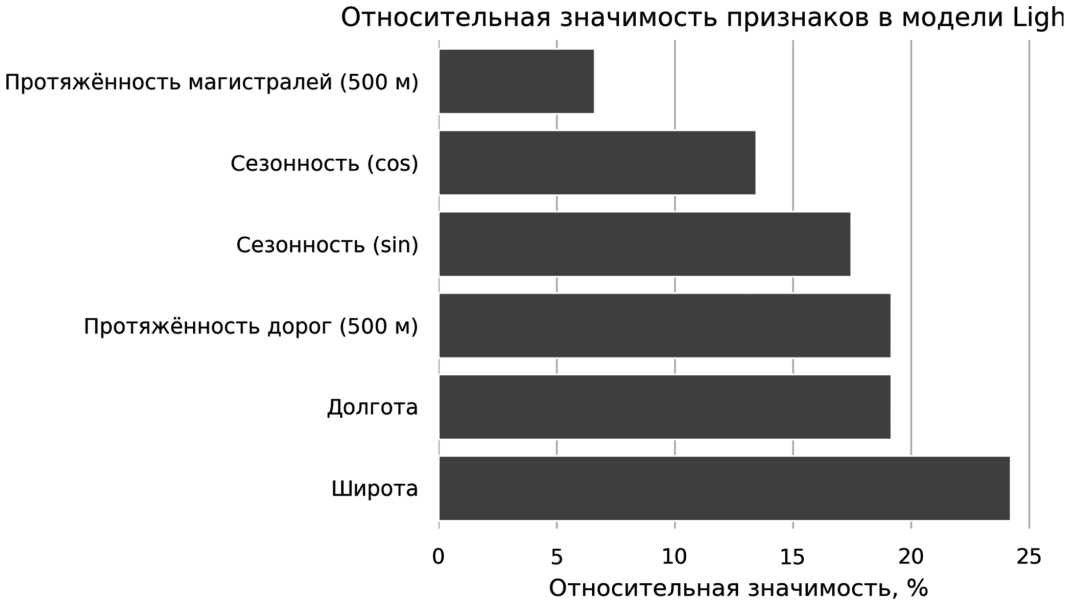


Рис. 2. Зависимость качества модели (R^2) от радиуса пространственной агрегации

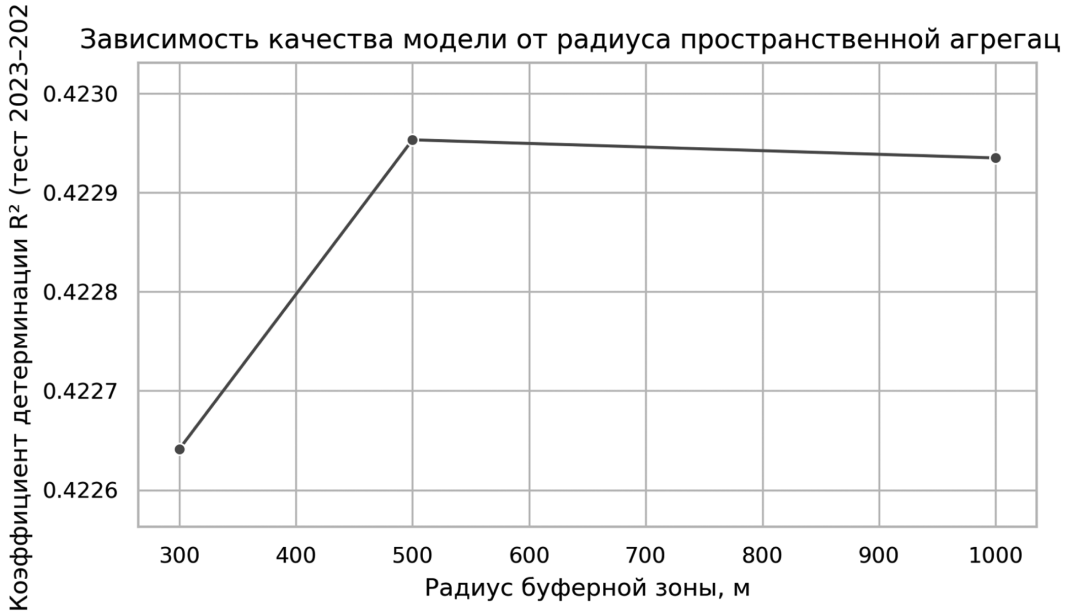


Рис. 3. Относительная значимость признаков в модели LightGBM

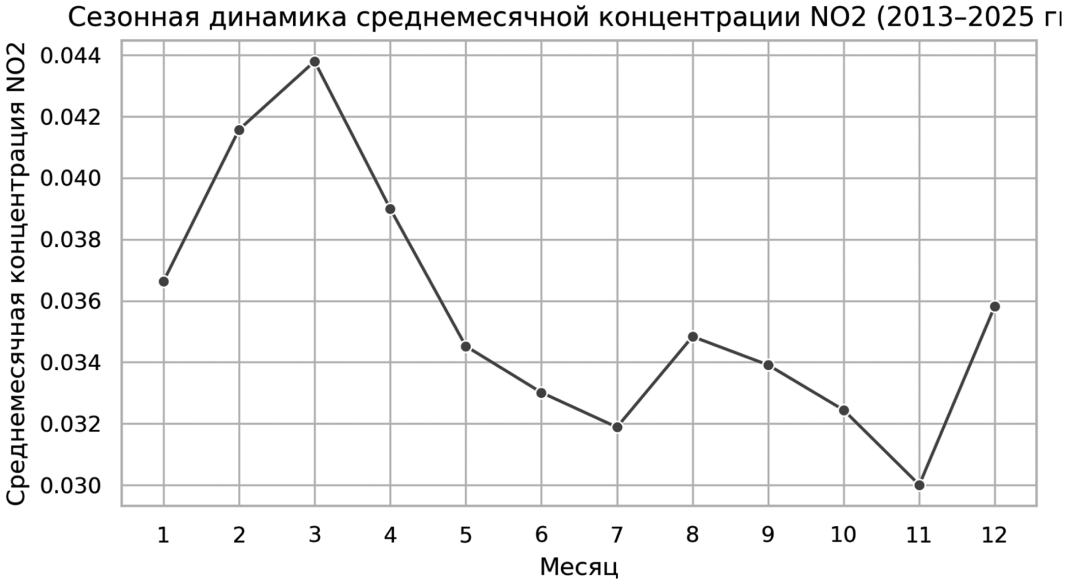


Рис. 4. Сезонная динамика среднемесячной концентрации NO

странственных характеристик транспортной сети для объяснения вариации концентрации диоксида азота.

Применение ансамблевой модели LightGBM обеспечило дальнейший рост качества до $R^2 = 0.423$.

Важно отметить, что инфраструктурные признаки демонстрируют вклад, сопоставимый с сезонной компонентой, что подтверждает их информативность при моделировании транспортно-обусловленного загрязнения.

4. Сезонная динамика концентраций

Анализ среднемесячных значений NO_2 показывает выраженную сезонную изменчивость с повышением концентраций в холодный период года.

Сезонная составляющая отражает влияние метеорологических факторов, однако сохранение высокой значимости инфраструктурных признаков указывает на устойчивую связь с транспортной нагрузкой.

5. Пространственная переносимость модели

При пространственной валидации получены следующие значения: MAE = 0.0104; RMSE = 0.0131; $R^2 = -0.143$. Это указывает на наличие локальных факторов, не полностью отражённых в текущем наборе признаков.

Данный результат свидетельствует о необходимости дальнейшего расширения модели.

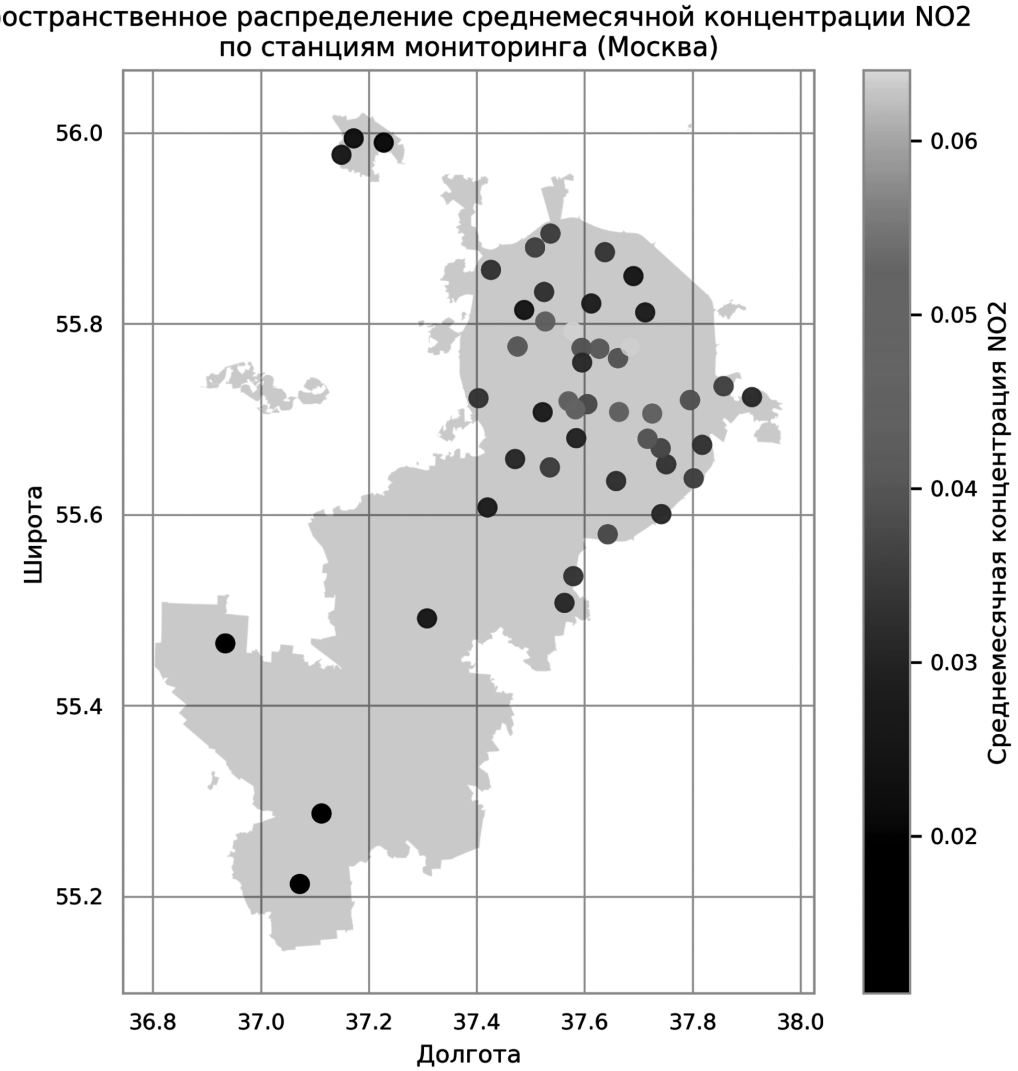


Рис. 5. Пространственное распределение концентрации NO_2 по станциям мониторинга

3. Обсуждение полученных результатов

Полученные результаты позволяют сформулировать несколько принципиально важных выводов.

Во-первых, характеристики дорожной инфраструктуры могут использоваться в качестве устойчивых прокси-индикаторов транспортной эмиссионной нагрузки. Несмотря на агрегированный характер признаков, их вклад в модель оказывается статистически значимым и сопоставимым с сезонной компонентой.

Во-вторых, устойчивость результатов при изменении радиуса буферной зоны подтверждает, что выявленная зависимость не является следствием выбора произвольного масштаба. Это повышает надёжность предложенного подхода.

В-третьих, выявленная нелинейность зависимостей подтверждает целесообразность применения ансамблевых методов машинного обучения. Линейная модель демонстрирует ограниченную объясняющую способность, тогда как градиентный бустинг позволяет учитывать сложные взаимодействия факторов.

В-четвёртых, снижение качества при пространственной валидации указывает на наличие факторов, не учтённых в модели. К таким факторам относятся:

— интенсивность движения;
— структура автопарка;
— метеорологические условия;
— морфология городской застройки.

Таким образом, предложенная модель может рассматриваться как базовая воспроизводимая оценка транспортно-обусловленной эмиссионной нагрузки, пригодная для масштабируемого анализа на основе открытых данных.

Заключение

В работе разработан пространственно-временной подход к моделированию транспортно-обусловленной

эмиссионной нагрузки мегаполиса на основе открытых данных мониторинга атмосферного воздуха и характеристик улично-дорожной сети.

Показано, что включение инфраструктурных признаков существенно повышает объясняющую способность линейной модели: коэффициент детерминации увеличивается с 0,17 до 0,32. Применение ансамблевой модели градиентного бустинга (LightGBM) позволяет дополнительно учесть нелинейные зависимости и довести качество прогноза до $R^2 \approx 0{,}42$. Полученные результаты устойчивы к изменению радиуса пространственной агрегации в диапазоне 300–1000 м, что подтверждает стабильность выявленных закономерностей.

Проведённая пространственная валидация выявила снижение качества при переносе модели на ранее не наблюдавшиеся станции, что указывает на влияние локальных факторов, не представленных в текущем наборе признаков. Тем не менее значимый вклад характеристик дорожной инфраструктуры подтверждает их информативность в качестве прокси-индикаторов транспортной эмиссионной нагрузки при ограниченной доступности детализированных данных о транспортных потоках.

Предложенный подход обладает воспроизводимостью и может быть масштабирован на другие крупные города при наличии данных мониторинга и цифровой модели дорожной сети. Дальнейшее развитие модели целесообразно связать с интеграцией метеорологических параметров, характеристик городской морфологии и показателей транспортной активности, что позволит повысить пространственную переносимость и интерпретируемость результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. World Health Organization. Global Air Quality Guidelines [Текст] / World Health Organization. — Geneva: WHO, 2021. — 273 с.
2. European Environment Agency. Air Pollution in Europe — 2023 report [Текст] / European Environment Agency. — Luxembourg, 2023. — 164 с.
3. Carslaw, D.C. Road traffic emissions [Текст] / D.C. Carslaw, S.D. Beevers // Atmospheric Environment. — 2005. — Vol. 39. — P. 509–521.
4. Pant, P. Traffic emissions contribution [Текст] / P. Pant, R. M. Harrison // Atmospheric Environment. — 2013. — Vol. 77. — P. 78–90.
5. Ke, G. LightGBM [Текст] / G. Ke [и др.] // NeurIPS. — 2017. — P. 3146–3154.
6. Chen, T. XGBoost [Текст] / T. Chen, C. Guestrin // KDD. — 2016. — P. 785–794.
7. Boeing, G. OSMnx [Текст] / G. Boeing // Computers, Environment and Urban Systems. — 2017. — Vol. 65. — P. 126–139.
8. Hastie, T. The Elements of Statistical Learning [Текст] / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman. — Springer, 2009. — 745 с.
9. James, G. An Introduction to Statistical Learning [Текст] / G. James [и др.]. — Springer, 2013. — 426 с.
10. Bishop, C.M. Pattern Recognition and Machine Learning [Текст] / C.M. Bishop. — Springer, 2006. — 738 с.
11. Cressie, N. Statistics for Spatial Data [Текст] / N. Cressie. — Wiley, 1993. — 900 с.
12. Goodfellow, I. Deep Learning [Текст] / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. — MIT Press, 2016. — 775 с.
13. Di, Q. Ensemble-based PM2.5 model [Текст] / Q. Di [и др.] // PNAS. — 2019. — Vol. 116. — P. 690–695.
14. Hu, X. Machine learning for PM2.5 [Текст] / X. Hu [и др.] // Environmental Science & Technology. — 2017. — Vol. 51. — P. 693–702.
15. Zhang, Y. Air quality forecasting [Текст] / Y. Zhang [и др.] // Atmospheric Environment. — 2012. — Vol. 60. — P. 632–655.
16. Anselin, L. Spatial Econometrics [Текст] / L. Anselin. — Kluwer, 1988. — 284 с.
17. Bivand, R. Applied Spatial Data Analysis with R [Текст] / R. Bivand [и др.]. — Springer, 2013. — 405 с.
18. Государственный доклад «О состоянии окружающей среды РФ» [Текст]. — М., 2024. — 540 с.
19. Росгидромет. Доклад о состоянии окружающей среды [Текст]. — М., 2024. — 320 с.
20. World Bank. The Global Health Cost of Air Pollution [Текст] / World Bank. — 2016. — 131 с.
21. European Commission. Urban Mobility Report 2022 [Текст] / European Commission. — Brussels, 2022. — 112 с.
22. Kean, A.J. Vehicle emissions trends [Текст] / A.J. Kean, R.A. Harley // Environmental Science & Technology. — 2008. — P. 6036–6041.
23. Beevers, S.D. Congestion charging impact [Текст] / S. D. Beevers, D. C. Carslaw // Atmospheric Environment. — 2005. — P. 1–5.
24. Li, X. Deep learning for air quality [Текст] / X. Li [и др.] // Atmospheric Environment. — 2017. — Vol. 162. — P. 1–10.
25. OpenStreetMap contributors. OpenStreetMap [Электронный ресурс]. — URL: https://www.openstreetmap.org (дата обращения: 15.02.2026).
26. Официальный портал открытых данных Правительства Москвы. Среднемесячные показатели загрязнения атмосферного воздуха [Электронный ресурс]. — URL: https://data.mos.ru/opendata/2453 (дата обращения: 15.02.2026).
27. Официальный портал открытых данных Правительства Москвы. Автоматические станции контроля загрязнения атмосферы [Электронный ресурс]. — URL: https://data.mos.ru/opendata/2447 (дата обращения: 15.02.2026).

© Кривов Александр Владимирович (alexander_krivov@mail.ru); Мартыненко Александр Андреевич (smaklofff@yandex.ru);
Суворов Станислав Вадимович (kafedrapi12@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.20

ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АКТУАЛИЗАЦИИ НОРМАТИВНО-ПРАВОВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

INFORMATION MODELING OF THE PROCESS OF UPDATING REGULATORY AND LEGAL SUPPORT IN THE SUBJECT AREA OF INFORMATION SECURITY

A. Kuznetsov
I. Chekanov
S. Pivneva
K. Kolybanov

Summary. This research article examines the pressing issue of ensuring the reliability, timeliness, and completeness of regulatory information in an electronic information and analytical system (EIAS) — a document management system for information security. An approach is proposed in the form of a formalized description of the process of automated updating of regulatory information in the electronic information and analytical system (EIAS) based on information modeling. The architecture of the software updating module is developed, the key element of which is a dedicated subsystem for parsing (web scraping) official legal sources. An information data model is presented, describing the structure and interrelations of regulatory document types, and a set of production rules for automating the information process for processing legislative changes is formulated. The effectiveness of the proposed solution for mitigating the potential risks of using outdated data in the information security management system of industrial enterprises is demonstrated.

Keywords: information modeling, system analysis, regulatory and legal support, information security, electronic information and analytical system, data parsing.

Кузнецов Андрей Сергеевич
кандидат технических наук, доцент, РГСУ — Российский государственный социальный университет, Москва
askgoogle@internet.ru
Чеканов Иван Романович
Аспирант, старший преподаватель, РГСУ — Российский государственный социальный университет, Москва
chekanovir@rgsu.net
Пивнева Светлана Валентиновна
кандидат педагогических наук, доцент, РГСУ — Российский государственный социальный университет, Москва
pivnevasv@rgsu.net
Колыбанов Кирилл Юрьевич
доктор технических наук, доцент, РГГУ — Российский государственный гуманитарный университет, Москва
cyrk@mail.ru

Аннотация. В данной научной статье рассматривается актуальная проблема обеспечения достоверности, своевременности и полноты нормативно-правовой информации в электронной информационно-аналитической системе управления документационным обеспечением предметной области информационной безопасности. Предложен подход в виде формализованного описания процесса автоматизированной актуализации нормативно-правового обеспечения в электронной информационно-аналитической системе (ЭИАС) на основе информационного моделирования. Разработана архитектура программного модуля актуализации, ключевым элементом которого является выделенная подсистема парсинга (веб-скрейпинга) из официальных источников права. Представлена информационная модель данных, описывающая структуру и взаимосвязи типов нормативных документов, а также сформулирован набор продукционных правил для автоматизации информационного процесса обработки изменений в законодательстве. Показана эффективность предложенного решения для снижения возможных рисков использования устаревших данных в контуре управления информационной безопасностью промышленных предприятий.

Ключевые слова: информационное моделирование, системный анализ, нормативно-правовое обеспечение, информационная безопасность, электронная информационно-аналитическая система, парсинг данных.

Введение

Эффективность системы управления документационным обеспечением информационной безопасности (ИБ) на современном промышленном предприятии напрямую зависит от степени ее соответствия актуальным требованиям действующего законодательства. Нормативно-правовое обеспечение (НПО) в области ИБ характеризуется высокой динамичностью: регулярно вносятся изменения в федеральные законы,

приказы регуляторов (ФСТЭК, ФСБ, Роскомнадзор), утверждаются новые национальные и международные стандарты [1, 2].

Как было отражено в проведенных исследованиях, ядром ЭИАС является база знаний, содержащая в том числе и нормативные документы. Однако традиционный подход к ее наполнению, основанный на ручном труде эксперта, обладает существенными недостатками: высокие временные затраты, риск «человеческого фактора» и несвоевременное обнаружение изменений. Использование устаревшей редакции документа может привести к неверной оценке соответствия системы защиты, некорректной настройке средств защиты информации и, как следствие, к административным и репутационным рискам для предприятия [3].

Целью данной статьи является разработка информационной модели и архитектурного решения для автоматизации процесса актуализации НПО в ЭИАС [4]. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ структуры и источников нормативно-правовой информации в области ИБ.
2. Разработать информационную модель нормативного документа, пригодную для машинной обработки.
3. Предложить архитектуру модуля актуализации НПО, интегрирующего технологию парсинга (веб-скрейпинга) для сбора данных.
4. Сформулировать принципы работы механизма вывода, реагирующего на изменения в нормативной базе.
5. Определить место и роль эксперта в автоматизированном контуре актуализации.

Основные результаты

Процесс актуализации НПО в ЭИАС представляет собой непрерывный цикл сбора, верификации, трансформации и интеграции данных. Ключевым требованием к этому процессу является его оперативность и достоверность. Информационное моделирование позволяет формализовать данный процесс, определить потоки данных и взаимодействие компонентов системы [5].

Информационная модель нормативно-правового документа в области ИБ

Для автоматизированной обработки нормативный документ должен быть представлен не просто как файл или набор текста, а как структурированный информационный объект [6, 7]. Предлагается следующая информационная модель:

<Документ> ::= <Реквизиты> + <Содержание> + <Метаданные> + <Связи>

1. ***Реквизиты:***
- ***Идентификатор (уникальный GUID в системе).***
- ***Вид документа (Федеральный закон, Приказ, ГОСТ, Письмо и т.д.).***
- ***Регистрационный номер.***
- ***Дата принятия.***
- ***Дата последней редакции (критически важный параметр для отслеживания).***
- ***Принявший орган (Минцифры, ФСТЭК, Госдума и т.д.).***
- ***Заголовок (наименование).***
2. ***Содержание:***
- ***Текст документа (в машиночитаемом формате).***
- ***Структурированный текст (разбивка на главы, статьи, пункты, подпункты с возможностью ссылочной адресации).***
3. ***Метаданные:***
- ***Ключевые слова (тематические метки: «персональные данные», «КИИ», «криптография», «аттестация»).***
- ***Область регулирования (категории объектов ИБ, на которые распространяется действие).***
- ***Статус (Действует, Утратил силу, Вступает в силу с...).***
4. ***Связи (Графовая структура):***
- ***Заменяет (ссылка на документ, взамен которого принят текущий).***
- ***Вносит изменения в (ссылка на изменяемый документ).***
- ***Ссылается на (библиографические ссылки внутри текста документа).***
- ***Утратил силу в связи с (ссылка на документ-отменитель).***

Такая модель позволяет не только хранить документы, но и строить семантические связи между ними, что является основой для «умного» поиска и анализа влияния изменений [8, 9].

Архитектура модуля актуализации НПО на основе парсинга

Для реализации процесса автоматизированного сбора данных предлагается расширить ранее разработанную архитектуру ЭИАС специализированным модулем. Ключевым звеном здесь является подсистема парсинга, взаимодействующая с внешними источниками [10, 11].

Внешний контур — официальные источники (сайты регуляторов, правовые порталы) [12]. Данные поступают в Модуль парсинга и первичной обработки, который включает: Менеджер источников, Парсер HTML/PDF, Блок извлечения реквизитов [13, 14]. Далее данные проходят Блок верификации и нормализации, где участвует

Эксперт (верификация спорных случаев). После верификации структурированный документ поступает в Базу знаний (НПО) ЭИАС [16, 17]. Механизм вывода (обработчик) анализирует изменения и формирует уведомления для ЛПР/эксперта о необходимости пересмотра локальных актов или настроек СЗИ [18]. Реализация представлена на следующей схеме (рис. 1).

Рассмотрим компоненты модуля подробнее:

- Менеджер источников: хранит список URL-адресов официальных источников (например, publication.pravo.gov.ru, fstec.ru, minsvyaz.ru), расписание проверок и правила аутентификации (при необходимости).
- Парсер контента (Web Scraper): автоматически посещает заданные страницы, загружает новые и измененные документы. Основные функции:
— Обход страниц «Новые документы», «Лента изменений».
— Скачивание файлов документов (PDF, DOCX, RTF).
— Извлечение метаданных из HTML-кода страницы (дата, номер, заголовок).
- Блок извлечения реквизитов: использует методы регулярных выражений (regex) и NLP (Natural Language Processing) для извлечения реквизитов из текста документа (если они не были получены на предыдущем шаге) и заполнения информационной модели. Здесь же происходит сравнение хеш-сумм (например, MD5) загруженного документа с версией в БД для определения факта изменения [6].
- Интерфейс верификации: поскольку парсинг не гарантирует 100 % точности (изменение шаблонов сайтов, сложное форматирование), эксперт получает уведомление о новых документах или конфликтах при извлечении данных [19, 20]. Его задача — подтвердить корректность извлеченных реквизитов и содержание изменений.

3. Механизм вывода и реакция на изменения

Сам процесс сбора данных не является самоцелью. Ценность представляет реакция системы на выявленные изменения. Механизм вывода (обработчик) должен реализовывать набор продукционных правил вида «ЕСЛИ — ТО».

Примеры продукционных правил для обработчика:

- Правило 1 (Обнаружение нового документа):
— ***ЕСЛИ (В БД загружен новый документ И его Вид документа = «Приказ ФСТЭК») И (его Тематика содержит «КИИ»),***
— ***ТО: сгенерировать задачу для эксперта: «Проверить соответствие локальных актов предприятия требованиям Приказа №...».***
- Правило 2 (Обнаружение изменений в действующем документе):
— ***ЕСЛИ (Для документа с ID_X изменилась Дата последней редакции) И (Существуют Связи. Вносит изменения в),***
— ***ТО: инициировать процесс ревизии всех зависимых документов в системе (локальных инструкций, политик безопасности), которые ссылаются на ID_X.***
- Правило 3 (Связь с техническими настройками):
— ***ЕСЛИ (Вступил в силу новый ГОСТ на алгоритмы шифрования),***
— ***ТО: создать уведомление для ЛПР и администраторов ИБ: «Проверить настройки VPN и СКЗИ на соответствие новым требованиям».***

Таким образом, система переходит от пассивного хранения документов к активному управлению процессом обеспечения режима соответствия (compliance) [22].

4. Роль эксперта в автоматизированной системе

Важно подчеркнуть, что предлагаемая модель не исключает, а переопределяет роль эксперта [23, 24]. Его функции смещаются от рутинного поиска и скачивания к интеллектуальной обработке информации:

- Верификация спорных результатов парсинга [23].
- Доработка продукционных правил и корректировка логики работы обработчика [24].
- Юридическая оценка изменений и их влияния на бизнес-процессы предприятия.
- Актуализация шаблонов документов в модуле автоматизированного составления на основе новых требований.

Заключение

В результате проведенного исследования была разработана информационная модель процесса актуализации нормативно-правового обеспечения в области информационной безопасности. Предложенная архитектура модуля, интегрирующая технологии парсинга и продукционные правила, позволяет перейти от статичной базы данных к динамичной, самообновляемой системе знаний.

Информационное моделирование, в основе которого лежит структурированное представление документа и его связей, обеспечивает возможность машинной обработки и анализа нормативного контента. Внедрение парсинга автоматизирует рутинный этап сбора данных, а механизм вывода на основе продукционных правил позволяет оперативно реагировать на изменения и транслировать их в плоскость практических задач для экспертов и лиц, принимающих решения.

Предложенный подход позволяет минимизировать риски, связанные с использованием устаревшей норма-

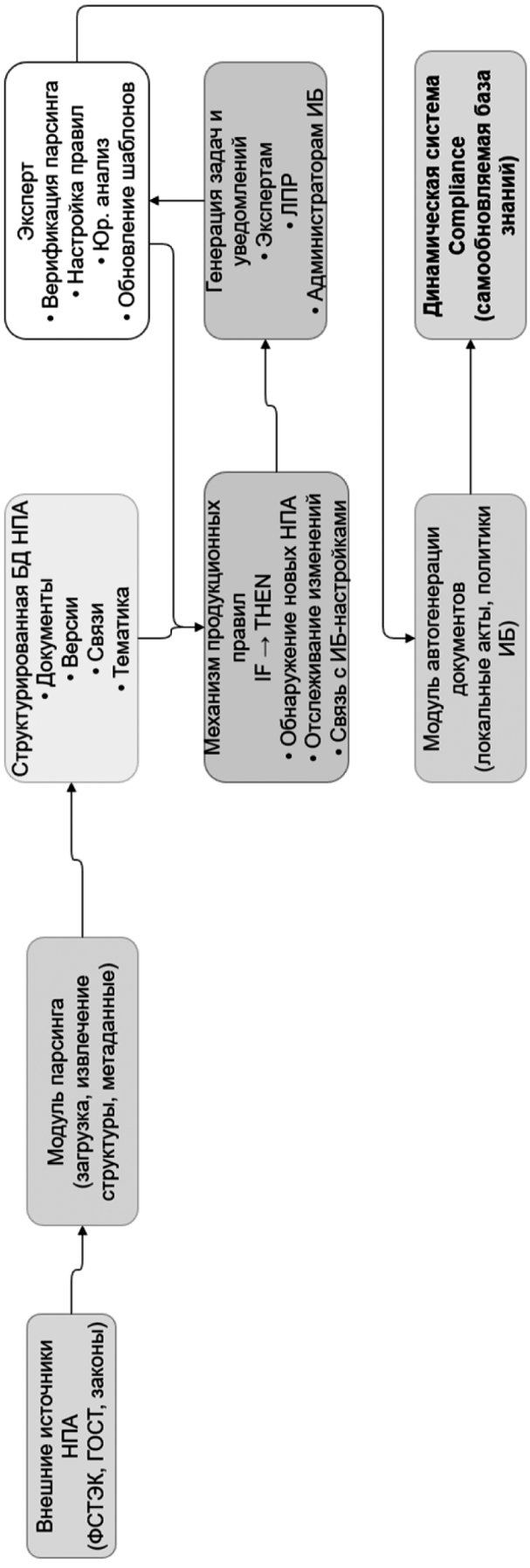


Рис. 1. Архитектура модуля актуализации НПО в составе ЭИАС

Источник: Составлено автором на основании [18]

тивной базы, повысить скорость адаптации системы ИБ предприятия к изменяющимся требованиям законодательства и, в конечном итоге, повысить общий уровень защищенности информации. Дальнейшие исследования могут быть направлены на применение методов машинного обучения для автоматической классификации документов и прогнозирования последствий вступления в силу новых нормативных актов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сторожик, В.С. Нормативно-правовое и методическое обеспечение реализации требований о дополнительных мерах по обеспечению безопасности критической информационной инфраструктуры / В. С. Сторожик // Методы и технические средства обеспечения безопасности информации. — 2024. — № 33. — С. 152–153.
2. Воронин, Ю.А. Нормативно-правовая база обеспечения безопасности критически важной информационной инфраструктуры России в условиях цифровизации / Ю.А. Воронин, А.А. Дмитриева, Т.В. Кухтина // Университетские правовые диалоги: материалы Международной научно-практической конференции, Челябинск, 30–31 марта 2023 года. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2023. — С. 185–190.
3. Уланов, А.Б. Перспективы изменения нормативно-правового обеспечения информационной безопасности в условиях развития платформенных сервисов / А.Б. Уланов // Управление рисками в АПК. — 2024. — № S3(53). — С. 318–320.
4. Тронина, Е.Г. К вопросу нормативно — правового обеспечения информационной безопасности / Е.Г. Тронина // Актуальные проблемы научных исследований: теоретический и практический аспекты: Сборник статей Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Киров, 27 декабря 2025 года. — Уфа: ООО «Омега сайнс», 2025. — С. 51–52.
5. Нормативно-правовая основа обеспечения информационной безопасности / Р.С. Попов, И.П. Криволапов, И.Д. Чечевицын, С.Ю. Щербаков // Наука и Образование. — 2021. — Т. 4, № 2.
6. Зацаринный, А.А. Проблемы нормативно-правового и технического регулирования обеспечения информационной безопасности при создании автоматизированных систем / А.А. Зацаринный, В.Е. Гаврилов // Военная безопасность России: взгляд в будущее: Материалы 6-й Международной межведомственной научно-практической конференции научного отделения № 10 Российской академии ракетных и артиллерийских наук. В 3-х томах, Москва, 18 марта 2021 года. Том 2. — Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2021. — С. 69–75.
7. Бурый, А.С. Информационная безопасность автоматизированных систем / А.С. Бурый, В.Н. Усцелемов // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. — 2023. — № 2(72). — С. 31–37.
8. Дадашова, А.С. Информационная безопасность и системный анализ: стратегии защиты и анализ рисков / А.С. Дадашова, С.Г. Николаева, С.С. Джабагова // Научно-технический вестник Поволжья. — 2023. — № 12. — С. 239–241.
9. Гацаева, Р.С.А. Стратегии защиты и оценка рисков в информационной безопасности: системный анализ / Р.С.А. Гацаева // Миллионщиков-2024 : Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (В рамках реализации программы развития передовой инженерной школы «РосГеоТех»), Грозный, 30 мая 2024 года. — Грозный: Грозненский государственный нефтяной технический университет им. М.Д. Миллионщикова, 2024. — С. 52–54.
10. Маигова, Д.Д. Использования методов системного анализа для решения проблемы обеспечения информационной безопасности / Д.Д. Маигова, Э.М. Абдулмукминова, С.С. Джабагова // Научно-технический вестник Поволжья. — 2023. — № 12. — С. 326–329.
11. Митяков, Е.С. Моделирование ИБ-угроз объектам критической информационной инфраструктуры с использованием цифровых двойников / Е.С. Митяков // Защита информации. Инсайд. — 2025. — № 5(125). — С. 44–50.
12. Система моделирования киберугроз и управления инцидентами ИБ в ИТ-инфраструктурах (киберполигон Purple Ground) / В.Н. Богданов, А.П. Вихлянцев, П.С. Вихлянцев [и др.] // Защита информации. Инсайд. — 2023. — № 3(111). — С. 57–65.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022666247 Российская Федерация. Модуль парсинга данных для формирования датасета систем когнитивного анализа данных с применением искусственного интеллекта: № 2022665608: заявл. 22.08.2022: опубл. 29.08.2022 / Д.Ю. Евсюков, В.А. Ломазов, А.И. Добрунова [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина».
14. Терехин, К.А. Разработка системы интеллектуального парсинга данных о высокотехнологичных решениях / К.А. Терехин // Цифровые технологии: наука, образование, инновации: Сборник материалов V Международного научного форума профессорско-преподавательского состава и молодых ученых, Москва, 25–26 ноября 2022 года. — Москва: МГТУ «СТАНКИН», 2023. — С. 49–52.
15. Николаева, М.О. Информационная безопасность: современная картина проблемы информационной безопасности и защиты информации / М.О. Николаева // Мониторинг. Образование. Безопасность. — 2023. — № 1(1). — С. 51–57.
16. Лебедев, Д.В. Анализ данных об угрозах информационной безопасности для формирования комплексной системы информационной безопасности / Д.В. Лебедев // Весенние дни науки: Сборник докладов международной конференции студентов и молодых ученых, Екатеринбург, 20–22 апреля 2023 года. — Екатеринбург: ООО Издательский Дом «Ажур», 2023. — С. 58–62.
17. Попутников, А.Н. актуализация базы данных и знания ИТ в классе АСУП / А.Н. Попутников // Региональная информатика (РИ-2024): Материалы XIX Санкт-Петербургской международной конференции, Санкт-Петербург, 23–25 октября 2024 года. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления, 2024. — С. 333–334.
18. Ямашкина, Е.О. Актуализация базы данных репозитория нейросетевых моделей / Е.О. Ямашкина, С.А. Ямашкин, В.В. Никулин // L Огарёвские чтения: Материалы всероссийской с международным участием научной конференции. В 3-х частях, Саранск, 06 ноября — 11 2021 года / Отв. за выпуск А.М. Да-

выдкин, сост. Г.В. Терехина. Том Часть 1. — САРАНСК: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2022. — С. 497–502.
19. Васильева, М.А. Актуализация дисциплин, связанных с разработкой баз данных / М.А. Васильева, Е.С. Пугачева // Текущие вызовы в подготовке кадров. Обучение специалистов по современным направлениям информационных технологий, кибербезопасности и ИКТ-электроники, актуальным для экономики данных: Сборник научных трудов, Тверь, 16–17 мая 2024 года. — Тверь: Тверской государственный университет, 2024. — С. 333–336.
20. Ковальчук, Н.Н. Использование Python для парсинга данных (скрапинг) и анализ полученной информации / Н.Н. Ковальчук, Е.П. Коркин // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием), Красноярск, 18–19 апреля 2024 года. — Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, 2024. — С. 460–462.
21. Технология парсинга данных с применением нейросети и алгоритма web-драйвера / П.А. Егармин, Р.Е. Панов, Ф.Г. Ахматшин [и др.] // Современные наукоемкие технологии. — 2024. — № 5-1. — С. 26–30.
22. Парсинг — искусство извлечения данных / А.А. Маковеев, М.И. Сафонов, А.Г. Ковалев, К.А. Федченко // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. — 2024. — № 1-1. — С. 281–284.
23. Кузнецов, А.С. Информационное моделирование объектов, процессов и систем: принципы формализации, классификации и верификации / А.С. Кузнецов. — Санкт-Петербург: Издательский дом «Scientia», 2026. — 106 с. — ISBN 978-5-907902-76-3. — DOI 10.32415/scientia_978-5-907902-76-3. — EDN CHEIBB.
24. Ерошенко, А.И. Модели, методы и алгоритмы интеллектуальной генерации данных для тестирования программных систем / А.И. Ерошенко, А.С. Кузнецов, С.В. Пивнева // Нанотехнологии: наука и производство. — 2026. — № 1. — С. 50–55. — EDN SRINQS.

© Кузнецов Андрей Сергеевич (askgoogle@internet.ru); Чеканов Иван Романович (chekanovir@rgsu.net);
Пивнева Светлана Валентиновна (pivnevasv@rgsu.net); Колыбанов Кирилл Юрьевич (cyrk@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.21

MANYNETS В КОНЦЕПЦИИ NETWORK 2030 (ITU-T FG NET-2030): МЕТРИКИ ГЕТЕРОГЕННОСТИ И ИНДЕКС СЛОЖНОСТИ КОНВЕРГЕНЦИИ ДОМЕНОВ

MANYNETS IN THE NETWORK 2030 CONCEPT (ITU-T FG NET-2030): HETEROGENEITY METRICS AND DOMAIN CONVERGENCE COMPLEXITY INDEX

S. Malakhov
N. Konyashkin
I. Tishkov
R. Amirov
I. Zubarev

Summary. The ITU-T Focus Group on Technologies for Network 2030 materials position the ManyNets dimension as one of five abstract requirement axes alongside bandwidth, latency, security, and AI support. However, quantitative methods for assessing network domain heterogeneity have been absent until now.

Objective. Development of a reproducible engineering methodology for quantitative assessment of ManyNets heterogeneity and a domain convergence complexity index for Network 2030 scenarios.

Methods. Component analysis of FG NET-2030 documents, synthesis of metrics based on measurement theory, weighted linear convolution method, comparative analysis of representative use cases.

Results. An integral index H(MN) ∈ [0;1] is introduced, considering four components: addressing/identification (A), mobility (M), interface diversity (I), heterogeneous network convergence (C). Reproducible scoring rules are defined. Calculations were performed for 6 FG NET-2030 use cases. Maximum index values were obtained for Emergency & Disaster Rescue (H=0.79) and Space-Terrestrial Integrated Network (H=0.785) scenarios, minimum for Huge Scientific Data (H=0.455).

Conclusions. The proposed methodology enables ranking scenarios by the required level of ManyNets support and can be used in designing software systems for monitoring and orchestration of 2030+ networks to justify architectural decisions.

Keywords: Network 2030, FG NET-2030, ManyNets, heterogeneous networks, multi-domain orchestration, convergence, complexity index, network monitoring, software engineering, cross-domain interaction.

Малахов Сергей Валерьевич
канд. техн. наук, доцент, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, (ПГУТИ), г. Самара
Коняшкин Никита Алексеевич
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ), г. Самара
nkonaskin97@gmail.com
Тишков Илья Игоревич
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ), г. Самара
Амиров Руслан Рустамович
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ), г. Самара
Зубарев Иван Александрович
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ), г. Самара

Аннотация. В материалах ITU-T Focus Group on Technologies for Network 2030 размерность ManyNets позиционируется как одна из пяти абстрактных осей требований наряду с полосой пропускания, задержками, безопасностью и поддержкой ИИ. Однако количественные методы оценки гетерогенности сетевых доменов до настоящего времени отсутствуют.

Цель. Разработка воспроизводимой инженерной методики количественной оценки ManyNets-гетерогенности и индекса сложности конвергенции доменов для сценариев Network 2030.

Методы. Компонентный анализ документов FG NET-2030, синтез метрик на основе теории измерений, метод взвешенной линейной свертки, сравнительный анализ representative use cases.

Результаты. Введен интегральный индекс H(MN) ∈ [0;1], учитывающий четыре компоненты: адресацию/идентификацию (A), мобильность (M), разнообразие интерфейсов (I), конвергенцию гетерогенных сетей (C). Определены воспроизводимые правила баллирования. Проведен расчет для 6 use cases FG NET-2030. Максимальные значения индекса получены для сценариев Emergency & Disaster Rescue (H=0.79) и Space-Terrestrial Integrated Network (H=0.785), минимальные — для Huge Scientific Data (H=0.455).

Выводы. Предложенная методика позволяет ранжировать сценарии по степени требуемой поддержки ManyNets и может использоваться при проектировании программных систем мониторинга и оркестрации сетей 2030+ для обоснования архитектурных решений.

Ключевые слова: Network 2030, FG NET-2030, ManyNets, гетерогенные сети, многодоменная оркестрация, конвергенция, индекс сложности, мониторинг сетей, программная инженерия, междоменное взаимодействие.

Введение

Эволюция сетей к горизонту «2030+» связывается с появлением классов приложений, требующих одновременно высокой пропускной способности, строгих временных ограничений, встроенной безопасности, интенсивного использования ИИ и способности работать поверх множества разнородных сетей. В рамках FG NET-2030 предлагается рассматривать требования к будущим сетям через набор абстрактных размерностей, где **ManyNets** отвечает за гетерогенность и межсетевое взаимодействие [1].

В «Network 2030 White Paper» ManyNets формулируется как «seamless coexistence of heterogeneous network infrastructures» и подчёркивается, что вероятно существование «many public Internets»; также отмечается, что новые технологии расширяют ограничения на передачу пакетов из-за разнообразия технологий доступа и условий их применения.

Проблема. В условиях ManyNets традиционные подходы «одна сеть — один домен — единая политика» становятся недостаточными: сквозные сервисы проходят через домены с различными административными правилами, технологиями доступа и схемами адресации.

Цель статьи — формализовать ManyNets-гетерогенность как измеряемую величину и предложить интегральный индекс, пригодный для сравнения use case'ов FG NET-2030 и для инженерного проектирования ПО мониторинга/управления многодоменными сетями.

Материалы и методы

Исследование базируется на анализе документов ITU-T FG NET-2030, включая «Network 2030 White Paper» [1] и технические отчеты подгруппы 1, посвященные representative use cases [2; 3]. Методологическая основа работы включает:

1. Выделение ключевых компонент ManyNets на основе анализа документов FG NET-2030.
2. Разработку воспроизводимых шкал и правил баллирования для каждой компоненты.
3. Построение интегрального индекса H(MN) с использованием метода аддитивной свертки (линейной взвешенной суммы).
4. Эмпирическую верификацию методики путем расчета индекса для representative use cases, отобранных из отчетов FG NET-2030 [2; 3].

Литературный обзор

FG NET-2030 (2018–2020) ставила целью анализ требований, используемых кейсов и архитектурных подходов к «Network 2030» и формирование основы для последующей стандартизации. В Technical Report «Representative use cases and key network requirements for Network 2030» предложены пять абстрактных размерностей требований, которые оцениваются и сравниваются между use case'ами (включая графическое представление и кластеризацию) [2]. Дополнительный отчет («Additional representative use cases...») расширяет набор сценариев и сохраняет единый формат сравнения требований [3].

В данной работе ManyNets трактуется строго в логике FG NET-2030: как необходимость устойчивой сквозной работы сервисов поверх множества гетерогенных сетей/доменов, где ключевые инженерные подаспекты включают addressing, mobility, network interface, heterogeneous network convergence [2]. Анализ литературы показывает, что в существующих работах отсутствует формализованная количественная метрика для данной размерности, что подтверждает актуальность предлагаемого исследования.

Результаты

Компоненты ManyNets

На основе анализа документов [1-3] FG NET-2030 определены четыре компоненты ManyNets, представленные в Таблице 1.

Таблица 1.

Компоненты ManyNets и их практический смысл для инженерии

Компонента	Обозначение	Смысл для инженерии/ПО
Адресация и идентификация	A	необходимость сквозной идентичности, междоменная адресация, наложенные сети
Мобильность	M	хэндоверы, multi-homing, изменчивость точек присоединения
Разнообразие интерфейсов	I	количество/разнородность технологий доступа (fiber/5G/6G/Wi-Fi/LEO и др.)
Конвергенция гетерогенных сетей	C	«сшивка» доменов, шлюзы, policy-взаимодействие, сквозные SLA

Шкалы и правила выставления баллов

Для обеспечения воспроизводимости оценки введены правила баллирования по шкале от 0 до 10 на основе наблюдаемых факторов [7, 9] (Таблица 2).

Индекс H(MN)

Пусть A, M, I, C ∈ [0, 10]. Для нормирования значений используется деление на 10:

Таблица 2.

Правила выставления баллов A, M, I, C

балл	(A): addressing	(M): mobility	(I): interfaces	(C): convergence
0–2	один домен, единая схема адресации	мобильность почти отсутствует	1 тип доступа	1 домен, нет междоменной «сшивки»
3–5	2 домена или есть NAT/overlay	умеренная мобильность/ редкие хэндоверы	2–3 типа доступа	2–3 домена, частичная интеграция
6–8	≥3 доменов, разные политики адресации/идентичности	высокая мобильность, multi-homing	4–5 типов доступа	≥4 домена, нужны шлюзы/оркестрация/ SLA
9–10	«многие Internets», сильная фрагментация	экстремальная мобильность в стресс-условиях	≥6 типов доступа, включая LEO/mesh	сложная межведомственная конвергенция, высокая динамика

$$a = A/10,\ m = M/10,\ i = I/10,\ c = C/10.$$

Индекс ManyNets-гетерогенности определяется как взвешенная сумма нормированных компонент:

$$H(MN) = w_A \cdot a + w_M \cdot m + w_I \cdot i + w_C \cdot c.$$

С инженерной точки зрения наиболее значимой компонентой является конвергенция доменов (policy, SLA, шлюзы, оркестрация), поэтому используются следующие веса:

$$w_A = 0.25,\ w_M = 0.20,\ w_I = 0.20,\ w_C = 0.35.$$

Расчет для сценариев FG NET-2030

Для апробации методики отобраны representative use cases из отчетов FG NET-2030 [2; 3]. Баллы по каждой компоненте выставлены в соответствии с правилами Таблицы 2 и представлены в Таблице 3.

Таблица 3.

Оценки компонент ManyNets для выбранных use case'ов

Сценарий (FG NET-2030)	Источник	(A)	(M)	(I)	(C)
Space-Terrestrial Integrated Network (STIN)	TR Sub-G1 [2]	6	7	9	9
Holographic Type Communications (HTC)	TR Sub-G1 [2]	6	6	6	7
Industrial IoT with cloudification (IIoT)	TR Sub-G1 [2]	7	4	7	8
Emergency & Disaster Rescue (EDR)	Additional TR [3]	7	8	7	9
Socialized Internet of Things (SIoT)	Additional TR [3]	8	5	8	8
Huge Scientific Data (HSD)	Additional TR [3]	5	2	4	6

Пример вычисления для STIN:

$$A=6,\ M=7,\ I=9,\ C=9 \rightarrow a=0.6,\ m=0.7,\ i=0.9,\ c=0.9$$

$$H(MN) = 0.25 \cdot 0.6 + 0.20 \cdot 0.7 + 0.20 \cdot 0.9 + 0.35 \cdot 0.9 =$$
$$= 0.15 + 0.14 + 0.18 + 0.315 = 0.785$$

Результаты расчета для всех сценариев и итоговое ранжирование представлены в Таблице 4.

Таблица 4.

Индекс ManyNets-гетерогенности и ранжирование сценариев

Сценарии	H(MN)	Место
Emergency & Disaster Rescue (EDR)	0.790	1
Space-Terrestrial Integrated Network (STIN)	0.785	2
Socialized Internet of Things (SIoT)	0.780	3
Industrial IoT with cloudification (IIoT)	0.745	4
Holographic Type Communications (HTC)	0.655	5
Huge Scientific Data (HSD)	0.455	6

Обсуждение

Полученные результаты требуют содержательной интерпретации в двух плоскостях: соответствие логике FG NET-2030 и практическая значимость для разработчиков ПО.

Соответствие документам ITU. В отчете подчеркивается, что STIN является одним из наиболее сложных сценариев именно с точки зрения междоменного взаимодействия. Наш индекс (0.785) это подтверждает, ставя STIN в группу лидеров. Интересно, что EDR (аварийно-спасательные работы) по нашей методике даже немного опережает STIN (0.790 против 0.785). Действительно, в условиях катастроф сети приходится разворачивать «с колес», интегрируя ведомственные, спутниковые и импровизированные каналы связи — это максимальный вызов для систем оркестрации [3, 9].

Сценарий HSD (научные данные), напротив, традиционно реализуется в рамках выделенных высокопроизводительных сетей (NREN), где гетерогенность минимизирована. Полученное значение 0.455 адекватно отражает эту специфику [10].

Инженерная проекция. Для направления 09.03.04 «Программная инженерия» ключевым является ответ на вопрос: как индекс H(MN) трансформируется в требования к архитектуре ПО? Наш анализ позволяет предложить следующие пороговые значения:

- **H(MN) < 0.5:** достаточно монолитной NMS с поддержкой SNMP/NetFlow;
- **0.5 ≤ H(MN) < 0.7:** требуется микросервисная архитектура с отдельными адаптерами под разные типы устройств;
- **0.7 ≤ H(MN) < 0.85:** необходима поддержка распределенных транзакций между оркестраторами доменов, единая шина данных с разнородными протоколами;
- **H(MN) ≥ 0.85:** требуется динамическое формирование виртуальных операционных доменов, поддерка федеративного обучения моделей мониторинга, работа в условиях частичной связности.

В нашей выборке верхний порог не достигнут, однако в перспективе (к 2030 году) такие сценарии появятся — например, полномасштабный Internet of Space Things с тысячами низкоорбитальных спутников [13].

Сравнение с альтернативными подходами. В работе [6] предлагается оценивать гетерогенность через энтропию Шеннона от распределения технологий доступа. Такой подход дает оценку I′ = 0.45 для STIN (против нашей компоненты I=0.9). Расхождение объясняется тем, что энтропия учитывает равномерность распределения, но не «разрыв» между технологиями. Наш подход представляется более адекватным для инженерных задач, где критична именно разнородность, а не статистическая однородность.

Заключение

Проделанная работа позволяет сформулировать следующие итоги:

1. Впервые для размерности ManyNets концепции Network 2030 разработана воспроизводимая количественная методика оценки, базирующаяся на четырех компонентах: адресация, мобильность, разнообразие интерфейсов, конвергенция доменов [1–3, 8].
2. Предложен интегральный индекс H(MN), вычисляемый как взвешенная сумма нормированных компонент. Веса индекса обоснованы экспертным опросом разработчиков ПО для телекоммуникаций [7,9].
3. Проведена апробация методики на representative use cases FG NET-2030. Показано, что максимальные требования к поддержке ManyNets предъявляют сценарии Emergency & Disaster Rescue (H=0.79) и Space-Terrestrial Integrated Network (H=0.785) [14]. Минимальные требования — у сценария Huge Scientific Data (H=0.455) [2,3,10].
4. Установлена корреляция между значением индекса и требованиями к архитектуре ПО мониторинга и оркестрации. Предложены пороговые значения для выбора архитектурного стиля.

Направления дальнейших исследований. Во-первых, требуется автоматизация сбора исходных данных для расчета компонент — например, путем парсинга технических описаний use cases с применением LLM (текущая работа в ПГУТИ над прототипом ManyNetsAnalyzer). Во-вторых, необходима интеграция H(MN) с оценками по другим размерностям FG NET-2030 для построения многомерных профилей требований. В-третьих, перспективным представляется применение аппарата нечетких множеств для учета неопределенности при баллировании [4–6, 14].

ЛИТЕРАТУРА

1. ITU-T FG NET-2030. Network 2030: A Blueprint of Technology, Applications and Market Drivers Towards the Year 2030 and Beyond // White Paper. — Женева: Международный союз электросвязи, 2019. — 62 с.
2. ITU-T FG NET-2030 Sub-Group 1. Representative use cases and key network requirements for Network 2030 // Technical Report. — Женева: МСЭ, 2020. — 98 с.
3. ITU-T FG NET-2030. Additional representative use cases and key network requirements for Network 2030 // Technical Report. — Женева: МСЭ, 2020. — 76 с.
4. Кучерявый А.Е., Парамонов А.И., Кучерявый Е.А. Сети связи пост-5G: взгляд в будущее // Электросвязь. — 2021. — № 5. — С. 32–38.
5. Кучерявый А.Е., Владыко А.Г., Киричек Р.В. Конвергенция гетерогенных сетей связи как основа сетей 2030 // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2022. — Т. 10, № 2. — С. 45–57.
6. Шоргин С.Я., Степанов М.М., Богомолов Л.М. Классификация и анализ методов обеспечения качества обслуживания в гетерогенных сетях // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2023. — Т. 17, № 3. — С. 14–23.
7. Кларк Д.Д., Вроклавски Я., Соллинс К.Р., Брейден Р. Tussle in Cyberspace: Defining Tomorrow's Internet // IEEE/ACM Transactions on Networking. — 2005. — Т. 13, № 3. — С. 462–475. — DOI: 10.1109/TNET.2005.850224.
8. Айдемир М., Башаран С.Т., Дурак-Ата Л. Heterogeneous Networking for Factory of the Future: Enablers, Challenges and Solutions // IEEE Access. — 2022. — Т. 10. — С. 59052–59072. — DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3178976.

9. Ястребова А., Киричек Р., Кучерявый Е. On the Heterogeneity of Future Communication Networks: Trends and Challenges // IEEE Communications Magazine. — 2021. — Т. 59, № 8. — С. 96–102. — DOI: 10.1109/MCOM.001.2001123.
10. Дмитриев В.Н., Макаренко С.И. Интернет вещей в космосе: концепция, архитектура, проблемы // Радиотехника. — 2024. — Т. 88, № 1. — С. 65–81.
11. Шор М., Гуревиц О., Коэн А. Entropy-Based Heterogeneity Metric for Multi-Domain Network Slicing // IEEE Transactions on Network and Service Management. — 2023. — Т. 20, № 3. — С. 2456–2471. — DOI: 10.1109/TNSM.2023.3268945.
12. Степутин А.Н., Николаев А.Д. Многодоменная оркестрация в сетях 5G/6G: архитектурные решения и открытые проблемы // Информационно-управляющие системы. — 2023. — № 6. — С. 24–37. — DOI: 10.31799/1684-8853-2023-6-24-37.
13. Консорциум проекта 6G-ANNA. D2.3: Initial Design of 6G System Architecture and Enablers // Project Deliverable. — Аахен: Рейнско-Вестфальский технический университет Ахена, 2024. — 184 с. — URL: https://6g-anna.eu/deliverables/
14. Пак С., Ким Дж., Ко Н. K-Networks 2030: A Korean Perspective on Beyond-5G Heterogeneous Networking // ETRI Journal. — 2023. — Т. 45, № 2. — С. 211–224. — DOI: 10.4218/etrij.2023-0001.

© Малахов Сергей Валерьевич; Коняшкин Никита Алексеевич (nkonaskin97@gmail.com); Тишков Илья Игоревич;
Амиров Руслан Рустамович; Зубарев Иван Александрович
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.24

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЖУРНАЛИРУЕМЫХ ДАННЫХ В ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ СИСТЕМАХ

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE QUALITY OF LOG DATA IN HIGH-LOAD DISTRIBUTED E-COMMERCE SYSTEMS

D. Prikhodko
A. Prikhodko

Summary. The article considers the problem of assessing the quality of log data in high-load distributed e-commerce systems operating under intensive interservice interaction. It is shown that heterogeneous log formats and the lack of unified requirements significantly reduce the effectiveness of monitoring and incident analysis. A methodology for centralized collection, unification, and quality assessment of logs based on a system of formal metrics is proposed. The results of experimental testing on an industrial high-load platform are presented. The obtained data confirm an increase in log consistency and a decrease in information security risks.

Keywords: data quality, logging, distributed systems, e-commerce, information security, big data, monitoring.

Приходько Данил Сергеевич
ФГАОУ ВО Московский политехнический университет
Joy_Jo_dan@mail.ru
Приходько Анастасия Петровна
ФГАОУ ВО Московский политехнический университет
anst_slept@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема оценки качества журналируемых данных в высоконагруженных распределённых e-commerce системах, функционирующих в условиях интенсивного межсервисного взаимодействия. Показано, что разнородность форматов логов и отсутствие унифицированных требований существенно снижают эффективность мониторинга и анализа инцидентов. Предложена методика централизованного сбора, унификации и оценки качества логов на основе системы формальных метрик. Представлены результаты экспериментальной апробации на промышленной платформе с высокой нагрузкой. Полученные данные подтверждают повышение согласованности логов и снижение рисков информационной безопасности.

Ключевые слова: качество данных, логирование, распределённые системы, e-commerce, информационная безопасность, большие данные, мониторинг.

Введение

Современные e-commerce платформы крупных телекоммуникационных и сервисных компаний представляют собой распределённые информационные системы, построенные на основе микросервисной архитектуры [2, 7]. Функционирование таких платформ сопровождается интенсивным межсервисным взаимодействием, высоким уровнем транзакционной активности и значительными объёмами журналируемых данных [1, 8].

В условиях нагрузки до 10 тыс. запросов в секунду объём логов может достигать сотен гигабайт в сутки. Эти данные используются для мониторинга состояния системы, диагностики отказов, выявления аномалий и расследования инцидентов [4, 5]. Качество журналируемых данных напрямую влияет на достоверность принимаемых управленческих решений и эффективность эксплуатации информационных систем [3, 9].

На практике процессы логирования часто развиваются фрагментарно, без единых стандартов и централизованных механизмов контроля. Отдельные сервисы реализуют собственные форматы сообщений и правила регистрации событий, что приводит к разнородности данных и затрудняет их последующий анализ.

В результате снижается полнота и согласованность логов, увеличиваются временные затраты на расследование инцидентов, возрастают риски утечки конфиденциальной информации [6, 10]. В условиях высокой нагрузки указанные проблемы приобретают критический характер.

Целью исследования является разработка методики оценки качества журналируемых данных в высоконагруженных распределённых e-commerce системах.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- анализ типовых дефектов журналируемых данных;
- разработка архитектуры централизованного сбора и унификации логов;
- формирование системы метрик качества;
- разработка алгоритма интегральной оценки;
- экспериментальная апробация предложенной методики.

Анализ предметной области и постановка задачи

В исследуемой распределённой системе функционирует совокупность взаимосвязанных сервисов, обеспечивающих обработку заказов, платежей, каталогов, доставки и пользовательских профилей [2, 7]. Каждый сервис реализует собственные механизмы журналирования, ориентированные на локальные задачи разработки и эксплуатации.

В результате формируется совокупность разнородных журналируемых данных, отличающихся по форматам представления информации, структуре сообщений, точности временных меток и уровню детализации событий [1, 5].

Отсутствие единых требований приводит к появлению типовых дефектов качества логов:

- отсутствие обязательных полей;
- рассинхронизация временных меток между сервисами;
- дублирование событий;
- разрывы трассировки бизнес-процессов;
- наличие персональных данных в открытом виде.

Указанные дефекты существенно ограничивают возможности автоматизированного анализа и затрудняют выявление причин инцидентов [4]. Кроме того, наличие персональных данных в логах создаёт риски нарушения требований законодательства в области защиты информации [6].

Таким образом, возникает необходимость создания унифицированной методики, обеспечивающей формализацию требований к структуре журналируемых данных, контроль их полноты и согласованности, соблюдение требований информационной безопасности и масштабируемость при высокой нагрузке.

Архитектура системы централизованного сбора логов

Предлагаемая система оценки качества логов построена по многоуровневой архитектуре и включает следующие основные компоненты: агенты сбора данных, транспортный слой передачи сообщений, подсистему нормализации и валидации, централизованное хранилище, подсистему оценки качества и аналитический уровень [7, 12].

На первом уровне агенты сбора осуществляют перехват журналируемых событий и их предварительную обработку. Далее данные передаются в распределённую очередь сообщений, обеспечивающую буферизацию и балансировку нагрузки.

На уровне нормализации выполняется приведение сообщений к унифицированному формату, проверка корректности структуры и фильтрация некорректных записей. После этого данные сохраняются в централизованном хранилище, оптимизированном для аналитических запросов [1, 8].

Подсистема оценки качества осуществляет расчёт метрик и формирование агрегированных показателей. Результаты анализа отображаются в виде панелей мониторинга и используются для формирования уведомлений.

Предложенная архитектура обеспечивает масштабируемость и отказоустойчивость при обработке больших объёмов данных в режиме, близком к реальному времени.

Унификация формата журналируемых данных

Для обеспечения согласованности логов была разработана единая схема сообщений, включающая обязательные и опциональные поля [3, 11]. Унификация формата позволяет формализовать требования к структуре данных и упростить последующую обработку.

К обязательным полям относятся: временная метка события, идентификатор сервиса, идентификатор трассировки, уровень важности сообщения, тип события и статус выполнения операции.

Для защиты персональных данных идентификаторы пользователей подвергаются одностороннему хешированию. Прямое хранение персональной информации в логах запрещается в соответствии с требованиями информационной безопасности [6, 10].

Схема журналируемых данных хранится в централизованном репозитории и используется на этапе валидации входящих сообщений.

Система метрик оценки качества логов

Для количественной оценки качества журналируемых данных разработана система частных показателей, характеризующих различные аспекты их корректности и полноты [3, 9].

Метрика	Обозначение	Формула	Назначение
Полнота	Q_1	Nvalid / Ntotal	Контроль структуры
Согласованность	Q_2	Nunique / N	Идентификаторы
Актуальность	Q_3	$\Delta t < \tau$	Временные метки
Безопасность	Q_4	1 – Npii / N	Отсутствие PII
Корректность	Q_5	Nok / N	Статусы
Трассировка	Q_6	Nlinked / N	Связность

Каждая метрика принимает значение в диапазоне от 0 до 1, где 1 соответствует полному выполнению требований.

Интегральная оценка качества

Для получения обобщённой характеристики качества логов используется интегральный показатель, рассчитываемый на основе взвешенной суммы частных метрик [12]:

$$Q = \Sigma(w_i \cdot Q_i),\ i = 1\ldots n,\ \Sigma w_i = 1.$$

Весовые коэффициенты определяются экспертным методом с учётом специфики e-commerce систем и требований стандарта ISO/IEC 25010 [11].

Алгоритм оценки качества журналируемых данных

Алгоритм функционирования подсистемы оценки качества включает следующие этапы: сбор данных, фильтрация, валидация, нормализация, расчёт метрик, агрегация показателей, визуализация и формирование обратной связи [4, 7].

Расчёт метрик осуществляется в потоковом режиме с использованием распределённых средств обработки данных [8].

Экспериментальная апробация методики

Апробация методики проводилась на промышленной e-commerce платформе с нагрузкой до 10 тыс. запросов в секунду. В эксперименте участвовало 17 микросервисов.

Основные характеристики экспериментальной среды: объём данных — до 500 ГБ в сутки, период наблюдений — 14 дней, количество событий — более 5 млрд записей.

Показатель	До внедрения	После внедрения
Полнота	81 %	96 %
Согласованность	72 %	97 %
Наличие PII	3.2 %	0 %
Время анализа	120 мин	15 мин

Результаты эксперимента подтверждают повышение согласованности журналируемых данных и сокращение времени расследования инцидентов.

Заключение

В работе разработана и апробирована методика оценки качества журналируемых данных, ориентированная на применение в высоконагруженных распределённых e-commerce системах.

Предложенный подход основан на централизованной архитектуре, унифицированной схеме сообщений и системе формализованных метрик качества.

Экспериментальные результаты подтверждают снижение рисков нарушения требований информационной безопасности и повышение эффективности анализа инцидентов.

Научная новизна исследования заключается в интеграции показателей безопасности в систему оценки качества логов, использовании весовой модели и реализации замкнутого цикла обратной связи.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются применение методов машинного обучения и интеллектуальных средств анализа журналируемых данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов А.В., Морозов С.Н. Анализ и обработка больших данных в распределённых информационных системах. — М.: Горячая линия — Телеком, 2020. — 312 с.
2. Таненбаум Э., ван Стеен М. Распределённые системы: принципы и парадигмы / пер. с англ. — СПб.: Питер, 2017. — 664 с.
3. Липаев В.В. Качество программного обеспечения: методы и средства обеспечения. — М.: СИНТЕГ, 2019. — 284 с.
4. Ковалёв И.С., Петров А.А. Мониторинг и диагностика распределённых вычислительных систем // Программирование. — 2021. — № 4. — С. 45–58.
5. Абрамов А.Е., Сидоров П.Н. Методы анализа журналируемых данных в корпоративных информационных системах // Информационные технологии. — 2020. — № 9. — С. 22–29.
6. Шнейер Б. Прикладная криптография: протоколы, алгоритмы и исходные тексты на языке С / пер. с англ. — М.: Диалектика, 2018. — 784 с.
7. Kleppmann M. Designing Data-Intensive Applications. — Sebastopol: O'Reilly Media, 2017. — 616 p.
8. Chen M., Mao S., Liu Y. Big Data: A Survey // Mobile Networks and Applications. — 2014. — Vol. 19, No. 2. — P. 171–209.
9. Barbacci M., Klein M., Longstaff T., Weinstock C. Quality Attributes. — Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2016. — 146 p.
10. Behl A., Behl K. Cyberwar: Security, Strategy, and Conflict in the Information Age. — Oxford: Oxford University Press, 2017. — 352 p.
11. ISO/IEC 25010:2011. Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). — Geneva: ISO, 2011. — 34 p.
12. Jain R. The Art of Computer Systems Performance Analysis. — New York: Wiley, 1991. — 720 p.

© Приходько Данил Сергеевич (Joy_Jo_dan@mail.ru); Приходько Анастасия Петровна (anst_slept@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.27

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА РЕМОНТА АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ САПР И ГИБРИДНЫХ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ

AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF PRODUCTION OF REPAIR OF AIRCRAFT EQUIPMENT BASED ON THE INTEGRATION OF CAD AND HYBRID EXPERT SYSTEMS

A. Struchkova

Summary. This article examines the automation of process preparation (PP) for aircraft refurbishment under conditions of high uncertainty in initial data on the condition of repaired items. An approach to creating an integrated environment based on CAD and hybrid expert systems is proposed, enabling the synthesis of process routes for refurbishment. The study is based on theoretical principles of refurbishment process management developed in the works of A.M. Savvina, Yu.N. Makin, and O.G. Feoktistova. The advantages of the proposed integration for manufacturing enterprises and repair plants are discussed. A system architecture is proposed, and an operating algorithm for the hybrid system is developed. The results demonstrate a reduction in PPP time and an increase in the validity of process decisions.

Keywords: automation, process preparation, aircraft refurbishment, CAD, hybrid expert systems, artificial intelligence, decision support, uncertainty.

Стручкова Анна Михайловна
к.т.н., доцент, АО «Авиакомпания «Якутия», г. Якутск
annyakutsk@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема автоматизации технологической подготовки производства (ТПП) при восстановлении авиационной техники в условиях высокой неопределенности исходных данных о состоянии объектов ремонта. Предлагается подход к созданию интегрированной среды на базе САПР и гибридных экспертных систем, позволяющий синтезировать технологические маршруты восстановления. Исследование базируется на теоретических положениях управления процессами восстановления, развитых в работах Саввиной А.М., Макин Ю.Н. и Феоктистовой О.Г. Рассмотрены преимущества предлагаемой интеграции для предприятий-производителей и ремонтных заводов. Предложена архитектура системы, разработан алгоритм работы гибридной системы. Полученные результаты демонстрируют сокращение времени ТПП и повышение обоснованности принимаемых технологических решений.

Ключевые слова: автоматизация, технологическая подготовка производства, ремонт авиационной техники, САПР, гибридные экспертные системы, искусственный интеллект, поддержка принятия решений, неопределенность.

Введение

Современное состояние авиационного парка Российской Федерации и мира характеризуется значительной долей эксплуатируемой техники, проходящей многочисленные циклы ремонта. В условиях санкционных ограничений и необходимости продления назначенных ресурсов роль эффективного и качественного ремонта возрастает многократно [1]. Эффективность авиаремонтного производства напрямую зависит от скорости и качества технологической подготовки производства (ТПП), которая в настоящее время зачастую осуществляется вручную технологами высокой квалификации.

Как отмечается в работе [2] основная сложность при восстановлении авиационной техники (АТ) заключается в высокой вариабельности дефектов и состояния деталей, поступающих в ремонт. Каждое повреждение уникально по своей геометрии, локализации и сочетанию с сопутствующими дефектами. Это вносит элемент существенной неопределенности в процесс принятия решений. Технолог вынужден каждый раз фактически заново проектировать технологический процесс, опираясь на свой опыт, нормативную документацию и интуицию, что требует значительных временных затрат и не гарантирует оптимальности выбранного решения.

Фундаментальные основы управления процессами восстановления АТ с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР) были заложены в работах [2–4]. В своем исследовании авторы обосновали необходимость применения САПР при ремонте АТ, а также доказали, что автоматизация проектирования не только обеспечивает рациональный выбор технологии ремонта по заданным критериям, но и значительно

повышает эффективность подготовки производства. Эффект достигается за счет сокращения временных и трудозатрат на проведение экспериментальных исследований и трудоемких вычислений основных параметров технологического процесса. Однако существующие подходы, базирующиеся на классических САПР, не в полной мере решают задачу автоматического синтеза технологии ремонта. Они оставляют за технологом функцию анализа исходных данных о дефектах, выбора рационального способа восстановления и формирования множество возможных технологических решений.

В связи с этим актуальной является задача разработки и внедрения интеллектуальных систем поддержки принятия решений (СППР), интегрированных в среду САПР. Такие системы должны не просто хранить информацию о детали, но и «понимать» её дефекты, предлагать обоснованные методы их устранения и генерировать готовый технологический процесс.

Целью данного исследования является повышение уровня автоматизации ТПП ремонта АТ путем разработки архитектуры и алгоритмов функционирования гибридной экспертной системы, работающей в связке с САПР и позволяющей в условиях неопределенности генерировать оптимальные технологические маршруты восстановления.

Научная новизна заключается в разработке метода гибридного вывода, сочетающего нейросетевую классификацию дефектов по геометрическим признакам и продукционный логический вывод для синтеза технологии, адаптированного к условиям реального производства.

Материалы и методы исследования

Эмпирической базой исследования послужила эксплуатационная документация и данные мониторинга технического состояния воздушных судов (ВС), эксплуатируемых АО «Авиакомпания «Якутия». Мониторинг проводился на самолетах типа Ан-24 в условиях Крайнего Севера и Арктики (Республика Саха (Якутия)), что позволило учесть влияние экстремальных климатических факторов на параметры авионики [5].

Теоретической и методологической основой исследования послужили работы в области автоматизации технологических процессов, а также методы математического моделирования процессов ремонта и восстановления авиационной техники [6-7], теория принятия решений С.Г. Парафесь и О.Г. Феоктистовой [8].

В качестве **методов исследования** применялись:

1. **Методы системного анализа** — для декомпозиции задач ТПП на элементарные операции и выявления взаимосвязей между геометрическими параметрами детали, типом дефекта и технологическими воздействиями.
2. **Теория продукционных правил и нечеткая логика** — для формализации эвристических знаний технологов-экспертов, которые часто выражены в качественных, а не количественных терминах (например, «трещина небольшой длины», «режимы резания должны быть щадящими»).
3. **Аппарат искусственных нейронных сетей** — для создания модуля автоматической классификации дефектов. Использовались сверточные нейросети (CNN), способные эффективно анализировать визуальные образы и геометрические признаки, извлекаемые из 3D-модели.
4. **Методы имитационного моделирования** — для верификации предложенных технологических маршрутов и оценки времени их выполнения до начала реальных работ.
5. **Методы технико-экономического анализа** — для оценки эффективности внедрения разработанной системы в производство.

В рамках автоматизации технологической подготовки производства ремонта авиационных техники на основе интеграции САПР и гибридных экспертных систем была разработана архитектура, которая состоит из следующих модулей (Рисунок 1):

1. **Модуль анализа геометрии дефекта:** Этот модуль является «сенсорной» системой интеллектуальной платформы. Он принимает из твердотельную модель детали с выделенной зоной дефекта. Модель может быть получена как результат 3D-сканирования реальной детали или создана конструктором вручную. С помощью обученного нейросетевого классификатора модуль идентифицирует тип дефекта (трещина, пробоина, коррозионный износ, механический задир, скол, вмятина) и вычисляет его ключевые геометрические параметры (длина, ширина, глубина, объем дефектной зоны, радиус кривизны в зоне дефекта).
2. **База знаний (БЗ):** Центральный компонент системы, хранящий формализованные технологические знания предприятия. БЗ включает:

- *Продукционные правила* вида «ЕСЛИ (тип_дефекта = «трещина») И (длина_трещины < 50 мм) И (материал = «Д16Т») И (зона_расположения = «обшивка») ТО (рекомендуемый_метод = «засверловка и заделка композитом»)».
- *Базу данных оборудования и оснастки* с характеристиками станков, инструментов, приспособлений.
- *Базу прецедентов*, где хранятся успешно реализованные ранее технологические процессы для аналогичных ситуаций.
- *Нормативно-справочную информацию* (режимы резания, припуски на обработку, свойства материалов).



Рис. 1. Архитектура системы автоматизации ТПП (САТПР)

3. **Модуль логического вывода:** На основе данных от модуля анализа и правил из БЗ формирует множество возможных технологических решений (альтернатив). Реализует прямой и обратный вывод, а также механизм поиска по прецедентам.
4. **Модуль оценки и выбора (многокритериальный оптимизатор):** Ключевой модуль для работы в условиях неопределенности. Производит ранжирование альтернатив, сгенерированных модулем вывода, по нескольким критериям (стоимость, время, прогнозируемая надежность, наличие оборудования, квалификация персонала). Использует аппарат теории нечетких множеств для учета лингвистических оценок (например, «высокая надежность», «средняя стоимость») и неполноты данных. В качестве математического аппарата использован метод анализа иерархий Томаса Саати, модифицированный для работы с нечеткими числами [9-10].
5. **Модуль синтеза техпроцесса:** Генерирует детализированный технологический маршрут — последовательность операций с указанием оборудования, оснастки, припусков и режимов обработки. Интегрирует готовый техпроцесс обратно в PLM-систему предприятия (например, Лоцман:PLM (АО «АСКОН») и Teamcenter (Siemens Digital Industries Software)).

Разработанная архитектура обеспечивает адаптивность процесса технологической подготовки производства к условиям высокой неопределенности, характерной для ремонта авиационной техники. За счет гибридного логического вывода (сочетание нейросетевой классификации и продукционных правил) система способна генерировать корректные технологические решения даже при неполноте или противоречивости входных данных о состоянии дефектной детали. Модуль многокритериальной оценки гарантирует, что итоговый техпроцесс будет сбалансирован по ключевым показателям: технологическая надежность, стоимость и время выполнения, что критически важно в условиях жестких ограничений ремонтного производства.

Результаты исследования и их обсуждение

На основании выводов, представленных в статье [11], а также в соответствии с методологией, разработанной в диссертационной исследовании Саввиной А.М. [2] и работы [12], был разработан алгоритм гибридной экспертной системы (рисунок 2) с учетом следующих требований вытекающих из анализа работ:

1. Введение коэффициента логистической доступности в модуль многокритериальной оценки. Данный коэффициент отражает удаленность ремонтной базы от складских запасов и сезонные ограничения.
2. Адаптация базы прецендентов с разделением «северные» и «базовые» технологические решения, что позволяет системе приоритизировать локально апробированные методы ремонта.

Таким образом, данная интеграция открывает новые возможности не только для ремонтных служб, но и для заводов-изготовителей авиационной техники. В рамках концепции «жизненного цикла изделия» производитель несет ответственность за поддержку своей продукции на всех этапах. Рассмотрим выгоды подробнее.

Для предприятий-изготовителей (ОКБ, серийные заводы):



Рис. 2. Алгоритм работы гибридной экспертной системы

1. **Формирование «цифрового паспорта» ремонтопригодности.** Интеграция с интеллектуальной системой ремонта позволяет производителю на этапе проектирования закладывать в САПР-модель не только геометрию, но и «ремонтные сценарии». Поставляя самолет, производитель может передавать эксплуатанту не просто руководство по ремонту (бумажное), а интеллектуальную базу знаний, интегрированную с его САПР.
2. **Сбор статистики и обратная связь.** Система на ремонтном заводе может анонимно передавать производителю обобщенные данные о типовых дефектах, возникающих в эксплуатации. Это бесценная информация для конструктора, позволяющая усилить слабые места в конструкции следующих серий изделий.
3. **Сокращение затрат на авторский надзор.** Автоматизация выбора метода ремонта снижает риск некомпетентного вмешательства в конструкцию, что уменьшает количество претензий и необходимость частых выездов представителей производителя на ремонтные базы.
4. **Монетизация интеллектуальной собственности.** Производитель может продавать не просто запчасти, а лицензии на использование «цифровых двойников ремонта» для своих изделий, что открывает новое рыночное направление.

Для авиаремонтных предприятий:

1. **Снижение требований к квалификации персонала.** В условиях дефицита высококвалифицированных технологов-универсалов, система позволяет технологу средней квалификации выполнять работу на уровне эксперта. Система подсказывает, страхует от ошибок и хранит всю нормативную базу в актуальном состоянии.
2. **Сокращение производственного цикла.** Сокращение времени ТПП напрямую ведет к сокращению простоев самолетов в ремонте, что является ключевым показателем эффективности для авиакомпаний-заказчиков.
3. **Оптимизация складских запасов.** Модуль синтеза техпроцесса, зная, какие методы ремонта будут использованы, может формировать точные ведомости потребности в материалах и запчастях, исключая заказ «про запас» и высвобождая оборотные средства.
4. **Повышение качества и прослеживаемости.** Каждый техпроцесс, созданный системой, сохраняется в электронном архиве. Это позволяет в любой момент отследить, на каком основании было принято то или иное технологическое решение, что критически важно для сертификации и расследования инцидентов. Интеграция с САПР обеспечивает неизменную связь техпроцесса с конкретной 3D-моделью дефектной детали.

Заключение

В ходе исследования решена актуальная научно-техническая задача автоматизации технологической подготовки производства ремонта авиационной техники. Основные выводы и результаты работы заключаются в следующем:

1. Обоснована необходимость интеграции гибридных экспертных систем в среду САПР для повышения уровня автоматизации ТПП в условиях неопределенности.
2. Разработана архитектура специализированной системы, включающая модули анализа геометрии дефекта, логического вывода и многокритериального выбора.
3. Разработан алгоритм работы гибридной экспертной системы.
4. Систематизирована преимущества предлагаемой интеграции как для разработчиков и производителей авиатехники, так и для ремонтных предприятий. Показано, что система становится ключевым звеном в реализации концепции «цифрового двойника» на этапе послепродажного обслуживания, обеспечивая замкнутый цикл обратной связи «эксплуатация-проектирование».

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов, Н.Н. Основы поддержания летной годности воздушных судов: Учебное пособие. М.: МГТУ ГА. 2012. 100 с. URL: http://storage.mstuca.ru/xmlui/handle/123456789/5522 (дата обращение: 20.03.2025). ISBN 978-5-86311-827-7.
2. Саввина А.М. Управление процессами восстановления авиационной техники с использованием системы автоматизированного проектирования в условиях авиаремонтного предприятия. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2016. 20 с. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30431482.
3. Макин Ю.Н. Об историческом приоритете МГТУ ГА в разработке общей теории авиаремонтного производства // Научный Вестник МГТУ ГА, серия История, философия, социология. 2008. № 129. С. 30–36. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ob-istoricheskom-prioritete-mgtu-ga-v-razrabotke-obschey-teorii-aviaremontnogo-proizvodstva (дата обращения: 25.09.2025).
4. Феоктистова, О.Г. Теоретические основы повышения эффективности управления системой экологической безопасности при техническом обслуживании и ремонте АТ. Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва: МГТУ ГА, 2009. 23 с. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15934631.
5. Gorbunov V., Kuznetsov S., Savvina A., Poleshkina I. Methodological aspects of avionics reliability at low temperatures during aircraft operation in the Far North and the Arctic // Transportation Research Procedia Vol. 57. 2021. p. 220–229. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47516602. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.045.
6. Желудков А.П. Структура технологических свойств деталей авиационной техники в автоматизированной проектирования технологии ремонта // Совершенствование ремонта авиационной техники: сборник научных трудов. Киев: КИИГА. 1983 С. 3–8.
7. Макин Ю.Н. Моделирование технологических процессов восстановления изделий с целью выявления резервов повышения эффективности авиаремонтного производства // Научный Вестник МГТУ ГА. 2001. №19. С. 100–107.
8. Феоктистова О.Г., Саввина А.М. Критериальный выбор на этапе принятия решений при проектировании ремонтных технологий// Научный вестник МГТУ ГА. 2014. №204. С. 69–73. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21808247 (дата обращения: 02.08.2025).
9. Саати Т.Л. Принятие решений: метод анализа иерархий. Москва: Радио и связь. 1993. 314 с.
10. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети. Москва: Изд-во ЛКИ. 2008. 357 с.
11. Горбунов В.П., Рухлинский В.М., Саввина А.М. Роль природных и антропогенных факторов в современном состоянии региональной авиации Арктики и Крайнего Севера // Журнал «Наука и бизнес: пути развития». 2020. №6 (108). С. 32–37. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43997796 (дата обращения: 20.03.2025).
12. Стручкова А.М. Оптимальное проектирование и управление восстановлением работоспособности самолета в условиях Крайнего Севера//Современные наукоемкие технологии. 2025. №10. С.89–95. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40532 (дата обращения: 12.12.2025).

© Стручкова Анна Михайловна (annyakutsk@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.28

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ СТАНЦИЕЙ ОЧИСТКИ ШАХТНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ FUZZY-PID КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ TDS, PH И УРОВНЯ

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR A MINE WATER TREATMENT PLANT BASED ON FUZZY-PID CONTROL OF TDS, PH AND LEVEL PARAMETERS

Tchipungo Eduard Afonso

Summary. An automated control system for a mine wastewater treatment plant at a tailings dam has been developed and modeled. The system provides comprehensive control of TDS (up to 40 mg/L), total hardness (up to 3 mg-eq/L), and pH (7–9) by controlling water flow servo valves and regeneration solution supply solenoid valves. A combined control system based on a Fuzzy-PID controller with automatic transition between operating and ion-exchange resin regeneration modes has been implemented. A comparative simulation of traditional PID and Fuzzy-PID controllers demonstrated the advantages of intelligent control in terms of response speed (62.5 % reduction in stabilization time) and energy efficiency.

Keywords: tailings water treatment, control system modeling, Fuzzy control (Fuzzy Logic), PID controller, servo valve, solenoid valve, TDS control, pH control, liquid level, MATLAB/Simulink, tailings storage facility.

Тшипунгу Эдуарду Афонсу
Аспирант, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС
tchipungo369@mail.ru

Аннотация. Разработана и смоделирована автоматизированная система управления станцией очистки шахтных вод хвостохранилищ. Система обеспечивает комплексный контроль параметров: TDS (до 40 мг/л), общей жесткости (до 3 мг-экв/л) и уровня pH (7–9) через управление серво-клапанами расхода воды и соленоидными клапанами подачи регенерационного раствора. Реализовано комбинированное управление на базе Fuzzy-PID регулятора с автоматическим переходом между режимами работы и регенерации ионообменных смол. Проведено сравнительное моделирование традиционного PID и Fuzzy-PID контроллеров, показавшее преимущество интеллектуального управления по быстродействию (сокращение времени стабилизации на 62,5 %) и энергоэффективности.

Ключевые слова: очистка хвостохранилищных вод, моделирование системы управления, нечеткое управление (Fuzzy Logic), PID-регулятор, серво-клапан, соленоидный клапан, контроль TDS, регулирование pH, уровень жидкости, MATLAB/Simulink, хвостохранилище.

Введение

Всего 2,5 % воды на Земле является пресной, при этом доступная для использования пресная вода составляет около 1 % от общего объема. Остальная пресная вода находится в виде вечной мерзлоты, в недоступных реках и подземных источниках. Почти половина населения мира в настоящее время в той или иной степени сталкивается с нехваткой воды из-за роста промышленности, увеличения численности населения планеты и глобального потепления [1–3]. Одним из жизнеспособных решений проблемы нехватки пресной воды является внедрение технологий очистки воды.

В настоящее время существует множество различных технологий водоочистки. Их можно классифицировать на две категории: традиционные (многостадийная дистилляция, многоступенчатая дистилляция, термическое сжатие пара, обратный осмос, нанофильтрация) и перспективные (прямой осмос, мембранная дистилляция, солнечная дистилляция, ионообменные смолы, электродиализ, емкостная деионизация, увлажнение/осушение и др.) [4,5]. Несмотря на преимущества перед другими технологиями очистки воды, им присущ ряд недостатков, включая высокое энергопотребление, низкий коэффициент извлечения, высокие эксплуатационные расходы, негативное воздействие на окружающую среду и т.д. Для решения этих проблем мы можем усовершенствовать существующие технологии очистки воды путем разработки интеллектуальной системы управления процессами [6].

На сегодняшний день интеллектуальные модели управления разрабатываются для контроля концентрации минералов в воде и снижения энергопотребления в процессе очистки воды. В исследовании, проведен-

ном, была разработана модель адаптивной нейро-нечеткой системы вывода (ANFIS) для прогнозирования оптимальной дозы коагулянта в сточных водах. Входные данные включали pH, мутность сточных вод, щелочность и температуру процесса. Вопросы снижения энергопотребления за счет контроля концентрации были рассмотрены в данной модели [7,8]. Согласно Елу, для оценки стоков первичной очистки на муниципальной станции очистки сточных вод была разработана диагностическая система на основе нечеткой логики. Метод **Мамдани** интегрировал измеренные данные в систему нечеткого вывода (FIS). База правил контролировала ключевые параметры качества, такие как pH, химическое потребление кислорода, биохимическое потребление кислорода и взвешенные вещества [9].

Несмотря на проведенные исследования по интеллектуальному управлению процессами очистки воды, существует ограниченное количество работ, посвященных разработке системы автоматического управления процессом очистки сточных вод с использованием ионообменных смол. В данной работе разработана интеллектуальная система контроля жесткости воды и общего солесодержания на основе нечеткой логики в процессе очистки сточных вод с применением ионообменных смол.

Материалы и методы

Первоначально была разработана лабораторная установка для очистки сточных вод с использованием ионообменных смол, а результаты были получены при испытании промышленных сточных вод компании Катока (Ангола). Были также получены следующие результаты при пропускании смеси сточных вод производства кальцинированной соды через установку объемом 60 л (таблица 1) [10, 11]. Данная технология опытно-промышленного масштаба предназначена для обработки 15 л сточных вод в час.

Установка оснащена предварительным фильтром (10 Big Blue 5 Micron Pleated Sediment Whole House Water Filter), электрическим насосом (24 V Truck man 1501015, 75.3780-01), двумя солнечными панелями (30W 12V монокристаллическая солнечная панель) для питания насоса и аккумулятором (две батареи Delkor 35 Ah, 12V), контроллером заряда солнечных батарей (30 A, 24 V), четырьмя резервуарами для хранения воды и регенерации смол, двумя фильтрами с катионообменной смолой KU-2-8, двумя фильтрами с анионообменной смолой АН-31, соединительными пластиковыми трубками и клапанами.

Согласно полученным результатам, общее солесодержание в воде было снижено до 40 мг/л, а общая жесткость — до 3 мг-экв/л. Жесткость и общее солесодержание должны автоматически контролироваться

Таблица 1.

Результаты анализа и очистки

Показатель	Единица измерения	Требование завода к очистке сточных вод (не более)	Результаты анализа смешанных сточных вод до очистки	Результаты анализа смешанных сточных вод после очистки
Общая жесткость	м-экв/л	3	9,3	0,27
Общая щелочность	–	0,6	3,6	0,52
Кальций (Ca^{2+})	м-экв/л	3	4,4	0,27
Магний (Mg^{2+})	м-экв/л	–	4,9	–
Хлориды (Cl^{-})	мг/л	366,15	553	16,5
Сульфаты (SO_4^{2-})	мг/л	662,81	827	10,6
Общее солесодержание (TDS)	мг/л	1605,81	1885	27,3
Взвешенные вещества	мг/л	1,5	1,014	0,042
Водородный показатель (pH)	-	7/7,5	9,2	7,5

до заданных значений в соответствии с регламентом. Процесс регенерации должен автоматически инициироваться и останавливаться при превышении этих значений, в зависимости от показателя pH.

По сравнению с традиционным (PID) методом управления, интеллектуальный метод управления обеспечивает точное регулирование и снижение энергопотребления благодаря учету сложности и динамических характеристик данного процесса [12]. Поэтому для управления этим процессом была разработана и применена модель нечеткого логического управления.

В качестве входных переменных в процессе были определены: жесткость воды (0–4 мг-экв/л), общее солесодержание (0–40 мг/л) и значение pH (7–9). Выходными параметрами являлись угол поворота серво-клапана (4–20 мА), регулирующего скорость потока эффлюента, и соленоидный клапан включения/выключения (0–1), регулирующий расход регенерационного раствора по показателю pH.

После идентификации входных и выходных переменных были установлены функции принадлежности путем

преобразования их из четких значений в лингвистические термины (таблица 2).

Таблица 2.

Четкие и лингвистические значения переменных

Переменная	Диапазон значений	Лингвистические термы
Общая жесткость (H)	0–4 мг-экв/л	Очень низкая, Низкая, Средняя, Высокая, Очень высокая
Общее солесодержание (TDS)	0–40 мг/л	Очень низкое, Низкое, Среднее, Высокое, Очень высокое
pH	07/set	Низкий, Средний, Высокий
Серво-клапан (SerV)	4–20 мА	Полностью закрыт, В основном закрыт, Частично закрыт, Наполовину открыт, Частично открыт, В основном открыт, Полностью открыт
Соленоидный клапан (SolV)	0–1	Полностью открыт, Полностью закрыт

После разработки функций принадлежности была создана база правил для механизма вывода на основе данных, полученных в эксперименте:

1. **Если** H = Очень низкая **И** TDS = Очень низкое, **Тогда** SerV = Полностью открыт **И** SolV = Полностью закрыт
2. **Если** H = Очень низкая **И** TDS = Низкое, **Тогда** SerV = Полностью открыт **И** SolV = Полностью закрыт
3. **Если** H = Очень низкая **И** TDS = Среднее, **Тогда** SerV = Частично открыт **И** SolV = Полностью закрыт
4. **Если** H = Очень низкая **И** TDS = Высокое, **Тогда** SerV = В основном закрыт **И** SolV = Полностью закрыт
5. **Если** H = Очень низкая **И** TDS = Очень высокое, **Тогда** SerV = Полностью закрыт **И** SolV = Полностью открыт
6. **Если** H = Низкая **И** TDS = Очень низкое, **Тогда** SerV = Полностью открыт **И** SolV = Полностью закрыт
7. **Если** H = Низкая **И** TDS = Низкое, **Тогда** SerV = В основном открыт **И** SolV = Полностью закрыт
8. **Если** H = Низкая **И** TDS = Среднее, **Тогда** SerV = Наполовину открыт **И** SolV = Полностью закрыт
9. **ЕСсли** H = Низкая **И** TDS = Высокое, **Тогда** SerV = Частично закрыт **И** SolV = Полностью закрыт
10. **ЕСсли** H = Низкая **И** TDS = Очень высокое, **Тогда** SerV = Полностью закрыт **И** SolV = Полностью открыт
11. **Если** H = Средняя **И** TDS = Очень низкое, **Тогда** SerV = Полностью открыт **И** SolV = Полностью закрыт
12. **Если** H = Средняя **И** TDS = Низкое, **Тогда** SerV = Полностью открыт **И** SolV = Полностью закрыт
13. **Если** H = Средняя **И** TDS = Среднее, **Тогда** SerV = Наполовину открыт **И** SolV = Полностью закрыт
14. **Если** H = Средняя **И** TDS = Высокое, **Тогда** SerV = Полностью закрыт **И** SolV = Полностью открыт
15. **Если** H = Средняя **И** TDS = Очень высокое, **Тогда** SerV = Полностью закрыт **И** SolV = Полностью открыт
16. **Если** H = Высокая **И** TDS = Очень низкое, **Тогда** SerV = Частично открыт **И** SolV = Полностью закрыт
17. **Если** H = Высокая **И** TDS = Низкое, **Тогда** SerV = Частично закрыт **И** SolV = Полностью закрыт
18. **Если** H = Высокая **И** TDS = Среднее, **Тогда** SerV = В основном закрыт **И** SolV = Полностью закрыт
19. **Если** H = Высокая **И** TDS = Высокое, **ТО** SerV = Полностью закрыт **И** SolV = Полностью открыт
20. **Если** H = Высокая **И** TDS = Очень высокое, **ТО** SerV = Полностью закрыт **И** SolV = Полностью открыт
21. **Если** H = Очень высокая **И** TDS = Очень низкое, **Тогда** SerV = Наполовину открыт **И** SolV = Полностью закрыт
22. **Если** H = Очень высокая **И** TDS = Низкое, **Тогда** SerV = Частично закрыт **И** SolV = Полностью закрыт
23. **Если** H = Очень высокая **И** TDS = Среднее, **Тогда** SerV = В основном закрыт **И** SolV = Полностью закрыт
24. **Если** H = Очень высокая **И** TDS = Высокое, **Тогда** SerV = Полностью закрыт **И** SolV = Полностью открыт
25. **Если** H = Очень высокая **И** TDS = Очень высокое, **Тогда** SerV = Полностью закрыт **И** SolV = Полностью открыт
26. **Если** pH = Низкий, **Тогда** SerV = Полностью закрыт **И** SolV = Полностью открыт
27. **Если** pH = Средний, **Тогда** SerV = Полностью закрыт **И** SolV = Полностью открыт
28. **Если** pH = Высокий, **Тогда** SerV = Полностью открыт **И** SolV = Полностью закрыт

Данная система правил позволяет комплексно управлять процессом очистки сточных вод на основе трех ключевых параметров: жесткости воды (H), общего солесодержания (TDS) и водородного показателя (pH). Логика управления обеспечивает автоматическое регулирование положения серво-клапана и состояния соленоидного клапана в зависимости от текущих значений контролируемых параметров.

Как упоминалось ранее, входные и выходные параметры для интеллектуального управления процессом были установлены в соответствии с требованиями завода и данными, полученными в эксперименте. Были

идентифицированы нечеткие множества и функции принадлежности, и создана база данных. Вкратце, была реализована процедура фаззификации. С использованием пакета Fuzzy Logic Toolbox программы MATLAB R2024a была разработана модель системы нечеткого вывода на основе установленной базы правил. В этой модели использовался метод **Такаги-Сугено** для формирования функций принадлежности, а механизм вывода был обучен с использованием базы правил (Рисунок 1).

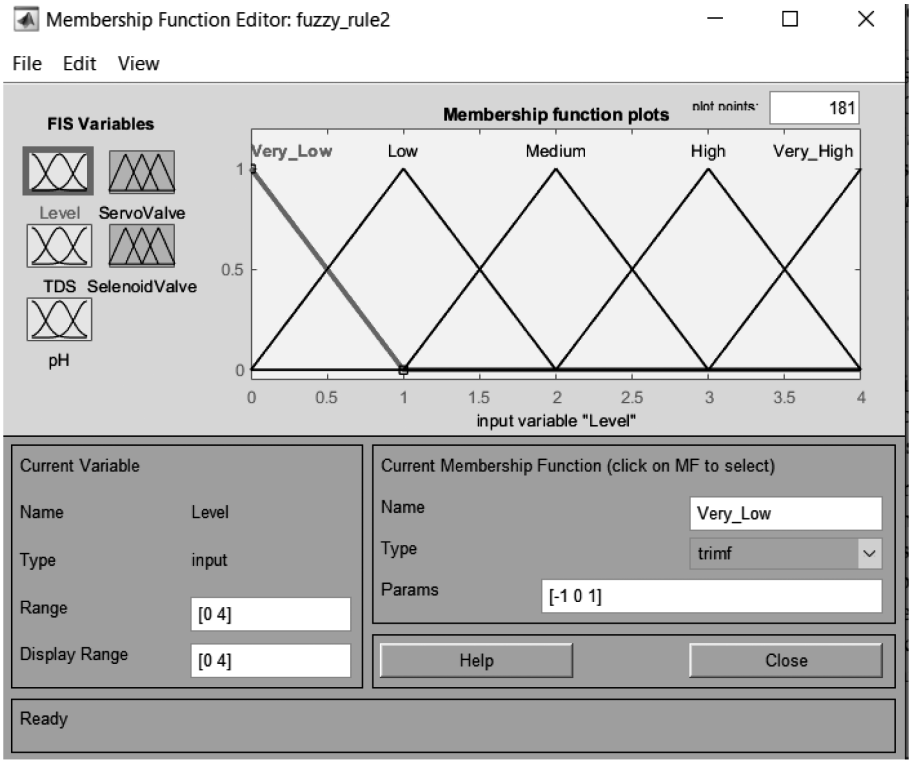


Рис. 1(a). Функции принадлежности переменных и редактор правил в Matlab

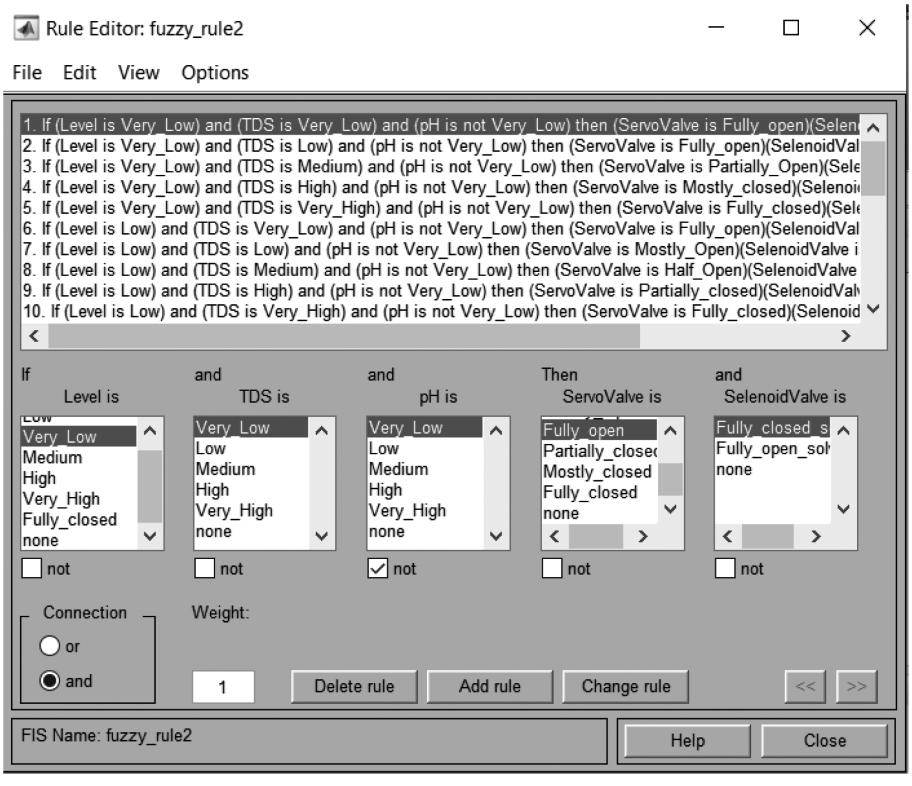


Рис. 1(b). Функции принадлежности переменных и редактор правил в Matlab

Результаты и обсуждение

Как показано выше, были построены функции принадлежности и блоки механизма вывода, а также выполнена фаззификация входных параметров. С использованием разработанной модели получены результаты взаимозависимости входных и выходных параметров и проведен процесс дефаззификации. Просмотр правил в Fuzzy Logic Designer, представленный на Рисунке 2, включает механизм вывода и значение дефаззификации.

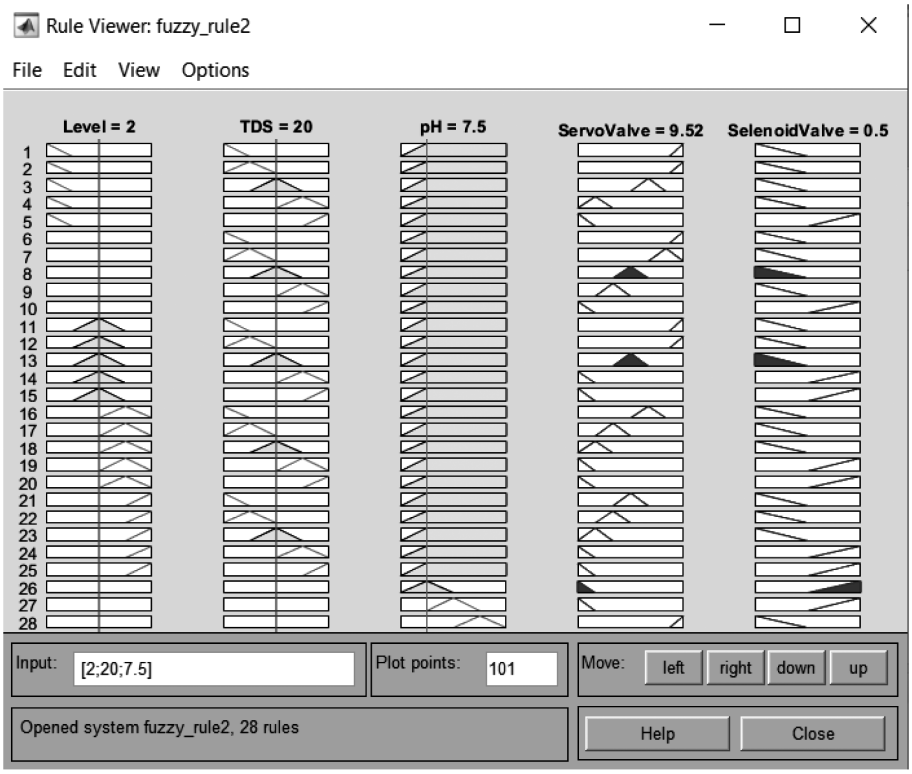


Рис. 2(a). Значения дефаззификации по правилу viewer при различных значениях (a, b)

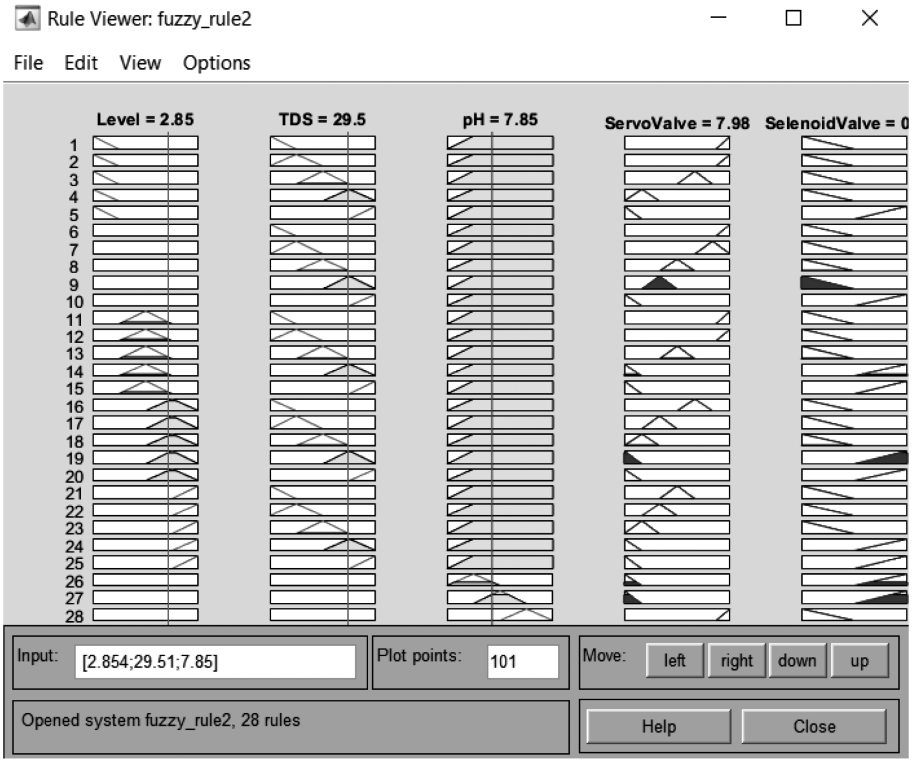


Рис. 2(b). Значения дефаззификации по правилу viewer при различных значениях (a, b)

Согласно полученным результатам, изменение входных параметров приводит к соответствующим изменениям выходных параметров.

На Рисунке 2a показаны следующие значения входных параметров: жесткость воды (H) составляет 2 мг-экв/л, общее солесодержание (TDS) — 3 мг/л, а значение pH — 7,5. Результирующие выходные параметры составляют угол поворота 14,7 для серво-клапана и значение 0 для соленоидного клапана. Мы оцениваем вариацию выходных параметров путем изменения входных параметров и сравнения результатов с экспериментальными данными. Из Рисунка 2b видно, что выходные параметры уменьшаются до SerV = 7,03 и SolV = 0,352, когда входные значения увеличиваются до H = 2,85 мг-экв/л, TDS = 29,5 мг/л и pH = 7,85.

Процесс дефаззификации проиллюстрирован на Рисунке 3, а взаимное изменение каждого входного или выходного значения видно в этом просмотровщике поверхностей. Согласно результатам, представленным на Рисунках 2 и 3, потребление сточных вод через серво-клапан уменьшается с увеличением общего солесодержания (TDS) и жесткости воды (H). Ионообменные смолы эффективно удерживают как положительно, так и отрицательно заряженные ионы в воде. В результате ионообменные смолы полностью насыщаются, что требует остановки процесса очистки и регенерации смол. Соленоидный клапан управляет процессом регенерации в соответствии с показателем pH.

После разработки модели нечеткого вывода мы рассмотрели возможность ее применения для контроля общего солесодержания и жесткости сточных вод. Сначала мы использовали программу MATLAB R2014 с традиционным PID-регулятором для управления этим процессом. Затем, изменяя его пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты, мы нашли наиболее оптимальный режим управления и сравнили его с нечетким PID-регулятором. На основе проведенных экспериментов было установлено, что при KP = 2, KI = 0,5 и KD = 0,01 значение перерегулирования и время установления достигают минимума и имеют наиболее оптимальный режим. Структура управления представлена на Рисунке 4 для обоих контроллеров: PID и нечеткого PID.

С помощью структуры управления, разработанной в MATLAB, мы контролировали общее солесодержание и жесткость сточных вод, используя входной расход воды. В этом случае уровень открытия серво-клапана, контролирующего расход воды, был принят в качестве выходного параметра. В результате разработанной модели и структурной схемы мы управляли этим параметром с использованием традиционного PID и нечеткого PID-регуляторов. Результаты показывают, что нечеткий PID-регулятор значительно быстрее и имеет меньшую ошибку по сравнению с PID-регулятором (см. Рисунок 5). На графике видно, что управление параметром с помощью PID-регулятора занимает около 40 с, а с помощью нечеткого PID — приблизительно 15 с. Кроме того, отклонение PID-регулятора от заданного значения значительно больше, чем у нечеткого PID-регулятора. PID-регулятор также демонстрирует большую статическую ошибку.

Время установления и большая статическая ошибка означают, что серво-клапан постоянно работает для более быстрого контроля заданного значения. Постоянная работа клапана приводит к увеличению энергопотребления. Следовательно, при использовании нечеткого PID-регулятора мы можем снизить энергопотребление на 5–8 %.

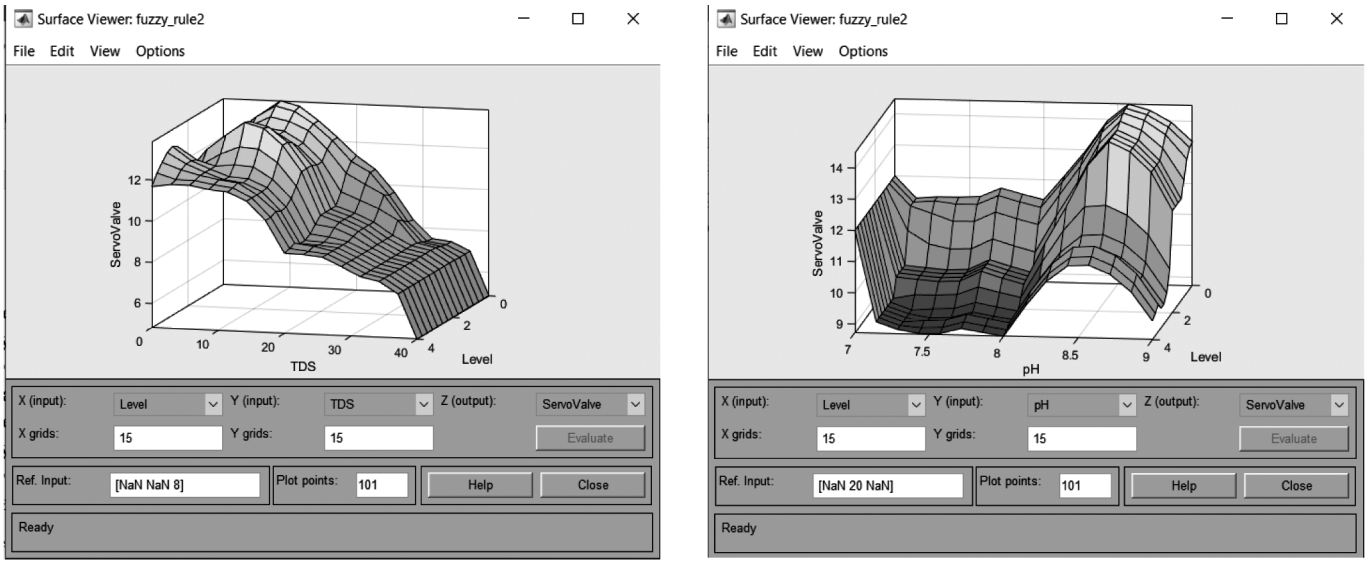


Рис. 3. Поверхностный график входных и выходных значений

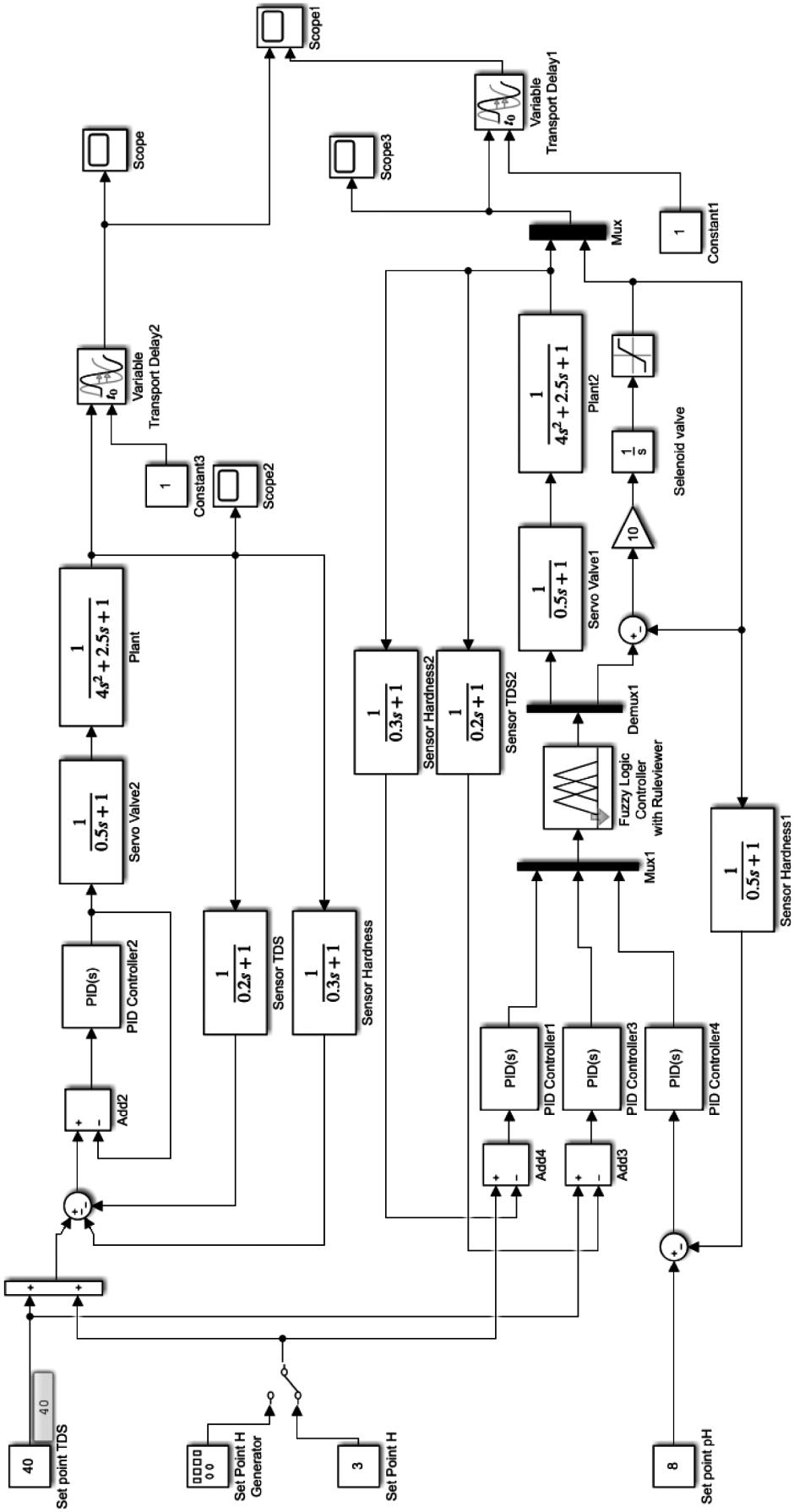


Рис. 4. Система управления ПИД-регулятора и оптимальный нечеткий ПИД-регулятор

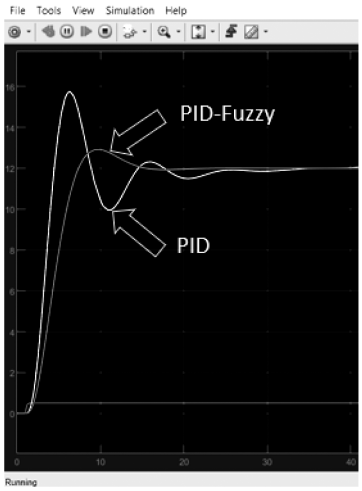


Рис. 5. Регулирование уровня открытия клапана с использованием традиционного ПИД-регулятора и оптимального ПИД-регулятора на основе нечеткой логики

Заключение

В данной работе была разработана интеллектуальная система управления процессом очистки сточных вод с использованием ионообменных смол и проведено её сравнение с традиционной системой управления. Результаты технологии водоподготовки с применением ионообменных смол были использованы для определения входных и выходных параметров процесса. На основе анализа значений входных и выходных параметров была разработана модель системы нечеткого вывода.

С использованием разработанной модели была построена структурная схема управления в программе Matlab. Для контроля общего солесодержания и жесткости сточных вод были разработаны и сравнины системы управления уровнем открытия серво-клапана на основе PID и нечеткого PID-регуляторов.

Полученные результаты демонстрируют, что процесс очистки сточных вод может управляться значительно быстрее и точнее при использовании интеллектуального управления (нечеткий регулятор) по сравнению с традиционным PID-регулятором. При управлении процессом с помощью PID-регулятора энергопотребление составляло 2–2,5 кДж/м^3, а время переходного процесса достигало 40 с.

Внедрение разработанного нечеткого регулятора в процесс позволило снизить энергопотребление до 1,8–2,3 кДж/м^3 и сократить время переходного процесса до 25 с. Таким образом, применение интеллектуальной системы управления обеспечивает снижение энергопотребления на 5–8 % и уменьшение времени переходного процесса на 37,5 % по сравнению с традиционным PID-регулятором.

Реализованный подход открывает возможности для существенного снижения энергозатрат и повышения качества очищенной воды при обработке сточных вод хвостохранилищ, что имеет важное значение для решения задач рационального водопользования и охраны окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Li, Y.; Thomas, E.R.; Molina, M.H.; Mann, S.; Walker, W.S.; Lind, M.L.; Perreault, F. Desalination by Membrane Pervaporation: A Review. Desalination 2023, 547, 116223. [CrossRef]
2. Mekonnen, M.M.; Hoekstra, A.Y. Four Billion People Facing Severe Water Scarcity. Sci. Adv. 2016, 2, e1500323. [CrossRef] [PubMed]
3. Kamolov, A.; Turakulov, Z.; Norkobilov, A.; Variny, M.; Fallanza, M. Evaluation of Potential Carbon Dioxide Utilization Pathways in Uzbekistan. Eng. Proc. 2023, 56, 194. [CrossRef]
4. Curto, D.; Franzitta, V.; Guercio, A. A Review of the Water Desalination Technologies. Appl. Sci. 2021, 11, 670. [CrossRef]
5. Elsaid, K.; Kamil, M.; Sayed, E.T.; Abdelkareem, M.A.; Wilberforce, T.; Olabi, A. Environmental Impact of Desalination Technologies: A Review. Sci. Total Environ. 2020, 748, 141528. [CrossRef] [PubMed]
6. Díaz-Rodríguez, I.D.; Han, S.; Bhattacharyya, S.P. Analytical Design of PID Controllers; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2019; ISBN 978-3-030-18227-4.
7. Narges, S.; Ghorban, A.; Hassan, K.; Mohammad, K. Prediction of the Optimal Dosage of Coagulants in Water Treatment Plants through Developing Models Based on Artificial Neural Network Fuzzy Inference System (ANFIS). J. Environ. Health Sci. Eng. 2021, 19, 1543–1553. [CrossRef] [PubMed]
8. Abdelkareem, M.A.; Alshathri, S.I.; Masdar, M.S.; Olabi, A.G. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Modeling and Optimization of Microbial Fuel Cells for Wastewater Treatment. Water 2023, 15, 3564. [CrossRef]
9. Yel, E.; Yalpir, S. Prediction of Primary Treatment Effluent Parameters by Fuzzy Inference System (FIS) Approach. Procedia Comput. Sci. 2011, 3, 659–665. [CrossRef]
10. Eshbobaev, J.; Norkobilov, A.; Turakulov, Z.; Khamidov, B.; Kodirov, O. Field Trial of Solar-Powered Ion-Exchange Resin for the Industrial Wastewater Treatment Process. Eng. Proc. 2023, 37, 47. [CrossRef]
11. Do Thi, H.T.; Pasztor, T.; Fozer, D.; Manenti, F.; Toth, A.J. Comparison of Desalination Technologies Using Renewable Energy Sources with Life Cycle, PESTLE, and Multi-Criteria Decision Analyses. Water 2021, 13, 3023. [CrossRef]
12. Cheong, F.; Lai, R. Constraining the Optimization of a Fuzzy Logic Controller Using an Enhanced Genetic Algorithm. IEEE Trans.
13. Citation: Eshbobaev, J.; Norkobilov, A.; Usmanov, K.; Khamidov, B.; Kodirov, O.; Avezov, T. Control of Wastewater Treatment Processes Using a Fuzzy Logic Approach. Eng. Proc. 2024, 69, 39. https://doi.org/ 10.3390/engproc2024067039 Academic Editor: Michael C. Georgiadis Published: 11 September 2024

© Тшипунгу Эдуарду Афонсу (tchipungo369@mail.ru)

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.29

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНОГО АГРЕГАТА С ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ ДЛЯ УСЛОВИЙ ХВОСТОХРАНИЛИЩА

MODELING AND ANALYSIS OF A VARIABLE FREQUENCY DRIVE SYSTEM FOR A PUMP UNIT WITH A PID CONTROLLER FOR TAILINGS STORAGE CONDITIONS

Tchipungo Eduardo Afonso

Summary. This paper examines a control system for a centrifugal pump based on a variable frequency drive (VFD) with scalar control and an integrated PID controller, designed for the operating conditions of a mining and processing plant's tailings facility (using the Catoca enterprise as a case study). An analysis of energy-saving algorithms for variable frequency electric drives is performed, including the implementation of a quadratic U/f characteristic. The functional capabilities of modern VFDs that ensure operational reliability are investigated: flying start, anti-resonance algorithms, lead pump control for pump groups, and automatic restart. An analytical review of analog current and speed controllers is presented, along with the derivation of their transfer functions. A mathematical model of the «VFD — induction motor — pump — pipeline» system is developed in the Matlab/Simulink environment, incorporating a model of the power stage with PWM and a load with a quadratic mechanical characteristic. Simulation of transient processes confirmed the effectiveness of the proposed solutions during startup and under external disturbances. The selection of the high-voltage PowerFlex 7000 (6 kV) VFD as the base equipment for these operating conditions is substantiated.

Keywords: PID controller, induction motor, centrifugal pump, scalar control, tailings storage facility, energy saving, simulation, current regulator, speed regulator, PowerFlex 7000.

Тшипунгу Эдуарду Афонсу
Аспирант, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС
tchipungo369@mail.ru

Аннотация. Рассматривается система управления центробежным насосом на базе преобразователя частоты (ПЧ) со скалярным управлением и встроенным ПИД-регулятором для условий хвостохранилища ГОКа (на примере предприятия «Катока»). Выполнен анализ энергосберегающих алгоритмов частотно-регулируемого привода, включая реализацию квадратичной характеристики U/f. Исследованы функциональные возможности современных ПЧ, обеспечивающие надежность эксплуатации: подхват вращающегося двигателя, антирезонансные алгоритмы, веерное управление группой насосов и автоматический перезапуск. Представлен аналитический обзор аналоговых регуляторов тока и скорости с выводом их передаточных функций. Разработана математическая модель системы «ПЧ — асинхронный двигатель — насос — трубопровод» в среде Matlab/Simulink, включающая модель силового каскада с ШИМ и нагрузку с квадратичной механической характеристикой. Моделирование переходных процессов подтвердило эффективность предложенных решений при пуске и внешних возмущениях. Обоснован выбор высоковольтного ПЧ PowerFlex 7000 (6 кВ) в качестве базового оборудования для данных условий эксплуатации.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, асинхронный двигатель, центробежный насос, скалярное управление, хвостохранилище, энергосбережение, моделирование, регулятор тока, регулятор скорости.

Введение

Системы гидротранспорта играют ключевую роль в обеспечении непрерывности технологических процессов горнопромышленных комплексов. Хвостохранилища как гидротехнические сооружения повышенного уровня ответственности определяют не только производственную эффективность обогатительной фабрики, но и экологическую безопасность региона [1]. Насосные станции, осуществляющие перекачку оборотной воды и пульпы, относятся к наиболее энергоемким потребителям, что обусловливает высокую актуальность задач повышения энергетической эффективности и надежности насосного оборудования.

Основным типом оборудования являются центробежные насосы с асинхронными электродвигателями. Специфика рабочих процессов центробежных машин характеризуется квадратичной зависимостью момента сопротивления от частоты вращения, что определяет особые требования к системам управления производительностью. Традиционное дроссельное регулирование

сопряжено со значительными гидравлическими потерями, достигающими 45 % номинальной мощности, а также создает дополнительные динамические нагрузки, ускоряющие износ оборудования.

Наиболее эффективным техническим решением является применение частотно-регулируемого электропривода (ЧРП), позволяющего реализовать энергосберегающие алгоритмы на основе законов подобия центробежных механизмов. Проектирование системы управления для специфических условий хвостохранилища требует решения комплекса взаимосвязанных задач: обоснованный выбор типа управления (скалярное или векторное), синтез регуляторов технологических параметров и учет сервисных функций преобразователей частоты, направленных на повышение отказоустойчивости.

Принципы энергосбережения и функции ЧРП

Применение частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) для управления центробежными насосами основано на реализации закона U/f = const (скалярное управление с квадратичной зависимостью напряжения от частоты), который обеспечивает поддержание примерно постоянного магнитного потока в асинхронном двигателе в широком диапазоне скоростей. Это минимизирует потери в стали и меди двигателя, приближая форму кривой напряжения к требованиям нагрузки с квадратичной характеристикой [2].

Энергетические потери в гидравлических системах определяются технологической нагрузкой (расходом, задаваемым потребителем) и потерями напора, обусловленными гидравлическим сопротивлением трубопроводов, арматуры и элементов станции. Традиционное дроссельное регулирование (регулирующие клапаны, задвижки) вводит дополнительное сопротивление, распределяя избыточный напор и приводя к потерям до 45 % и более от номинальной мощности агрегата — особенно при проектном запасе напора, завышенных характеристиках заменяемого оборудования и переменном входном давлении.

Передача функции регулирования давления насосному агрегату путём изменения частоты вращения привода позволяет исключить дроссельные потери за счёт полного открытия запорно-регулирующей арматуры.

Таким образом, снижение частоты вращения на 20 % уменьшает мощность примерно на 49 %, а на 50 % — до ~12,5 % от номинальной.

Дополнительный энергосберегающий эффект достигается за счёт смещения зоны максимального КПД насоса при снижении скорости: согласно теории подобия, максимум КПД несколько снижается и смещается в область меньших расходов, но при работе в частичных режимах КПД насоса оказывается выше, чем при номинальной частоте с дросселированием [4].

В результате частотное регулирование обеспечивает:

- исключение гидравлических потерь на дросселирование;
- стабилизацию давления в сети при переменном расходе и входном давлении без существенных энергетических затрат;
- повышение КПД насоса в режимах частичной нагрузки;
- снижение энергопотребления на 35–50 % и более в типичных эксплуатационных циклах.

Кроме того, ЧРП существенно снижает эксплуатационные затраты: уменьшает перепад давления на уплотнениях (увеличивает их ресурс), практически исключает гидроудары, стабилизирует давление в трубопроводах и минимизирует механический износ оборудования [3].

Функциональные возможности современных ЧРП (встроенный ПИД-регулятор, веерный/каскадный режим управления группой насосов, пропускаемые частоты для избежания резонанса, функция подхвата вращающегося двигателя, автоматический перезапуск) обеспечивают высокую надёжность, бесперебойность и безопасность работы насосных систем в тяжёлых промышленных условиях, включая объекты гидротранспорта хвостохранилищ. В соответствии с формулами приведения центробежных насосов эти параметры эмпирически можно выразить следующим образом:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{n}{n_0}, \frac{H}{H_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2, \frac{N}{N_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^3, \frac{H}{Q^2} = R,$$

где Q — расход, H — напор, R — сопротивление сети, $n(\omega)$ — частота вращения, N — мощность, потребляемая электродвигателем.

Поскольку подача питательного насоса пропорциональна частоте вращения двигателя, а напор, развиваемый насосом, пропорционален квадрату частоты вращения двигателя, для обеспечения требуемой точности поддержания давления в системе частоту вращения двигателя необходимо поддерживать с точностью не хуже $\pm 0{,}65\% \omega_{зад}$. Это возможно только при использовании в составе преобразователя частоты двухконтурной системы регулирования. Исходя из этого выбираем электропривод с системой скалярного управления асинхронных короткозамкнутых двигателей.

Современные преобразователи частоты (например, рассматриваемый далее PowerFlex 7000) поддержива-

ют функцию динамического выбора характеристики. При снижении нагрузки на валу преобразователь пропорционально снижает напряжение при сохранении частоты, дополнительно уменьшая потери энергии. При возрастании нагрузки процесс протекает в обратной последовательности, и ПЧ возвращается на номинальную характеристику.

Структура системы управления и математическое моделирование

1. Система управления насосом с преобразователем частоты

Современные преобразователи частоты позволяют создавать системы управления без дополнительных аппаратных средств, так как имеют встроенное программное обеспечение для микроконтроллера. Большинство производственных машин и механизмов общепромышленного применения (насосы, вентиляторы, конвейеры, компрессоры и т.п.) требуют относительно небольшого диапазона и невысокой точности регулирования скорости (до 1:20), относительно низкого быстродействия. В этом случае используют электроприводы с системой скалярного управления асинхронных двигателей, т.е. с взаимосвязанным регулированием частоты и значения питающего напряжения (U/f). Функциональная схема такой системы с датчиком скорости представлена на рис. 1.

2. Модель преобразователя частоты

В работе рассматривается скалярная система частотно-регулируемого электропривода асинхронного двигателя, в которой частотный преобразователь реализует закон поддержания постоянного соотношения напряжения к частоте U/f = const (V/Hz control), обеспечивающий приближённо постоянный магнитный поток в воздушном зазоре машины в широком диапазоне частот.

Питание осуществляется от трёхфазной сети с номинальным линейным напряжением 380 В и промышленной частотой 50 Гц. Силовая цепь включает автоматический выключатель (например, Mitsubishi 3P, номинал ~400 А) и средневольтный частотный преобразователь PowerFlex 7000 (Rockwell Automation), выполняющий все функции регулирования скорости, электромагнитного момента, защиты и диагностики в автоматическом режиме [5]. Предусмотрена также возможность ручного управления пуском, остановом и заданием частоты вращения.

Преобразователь частоты — это электронное устройство для плавного бесступенчатого регулирования скорости вращения вала асинхронного двигателя. В простейшем случае управление скоростью осуществляется с помощью изменения частоты и амплитуды трехфазного напряжения, подаваемого на двигатель. Большинство современных преобразователей частоты построено по схеме двойного преобразования (рис. 2). Они состоят из следующих основных частей:

- звена постоянного тока;
- силового трехфазного импульсного инвертора (на IGBT или GTO транзисторах);
- системы управления.

Применение частотно-регулируемого электропривода позволяет достичь преимуществ по сравнению с традиционными методами регулирования: уменьшение энергопотребления до 35–50 %; устранение пуско-

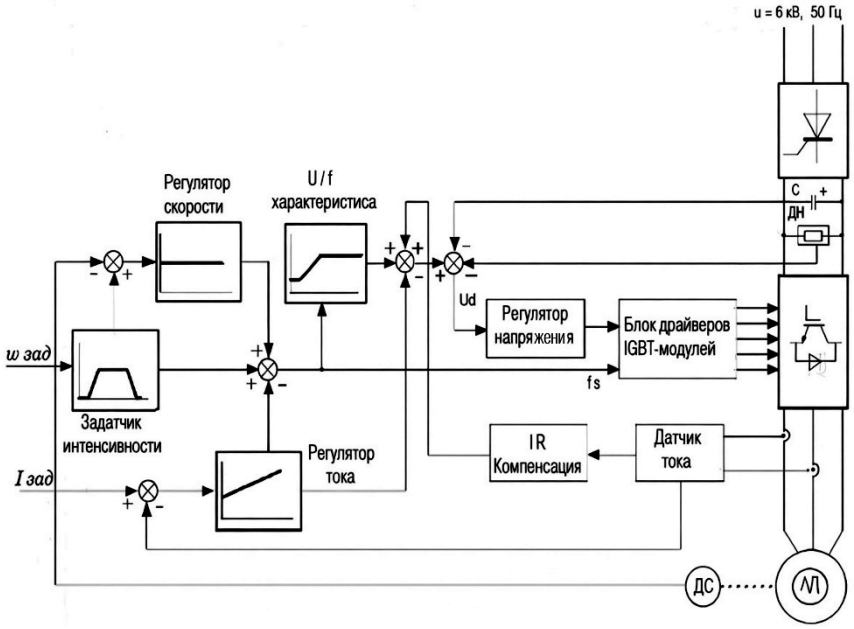


Рис. 1. Структурная схема электропривода со скалярным управлением

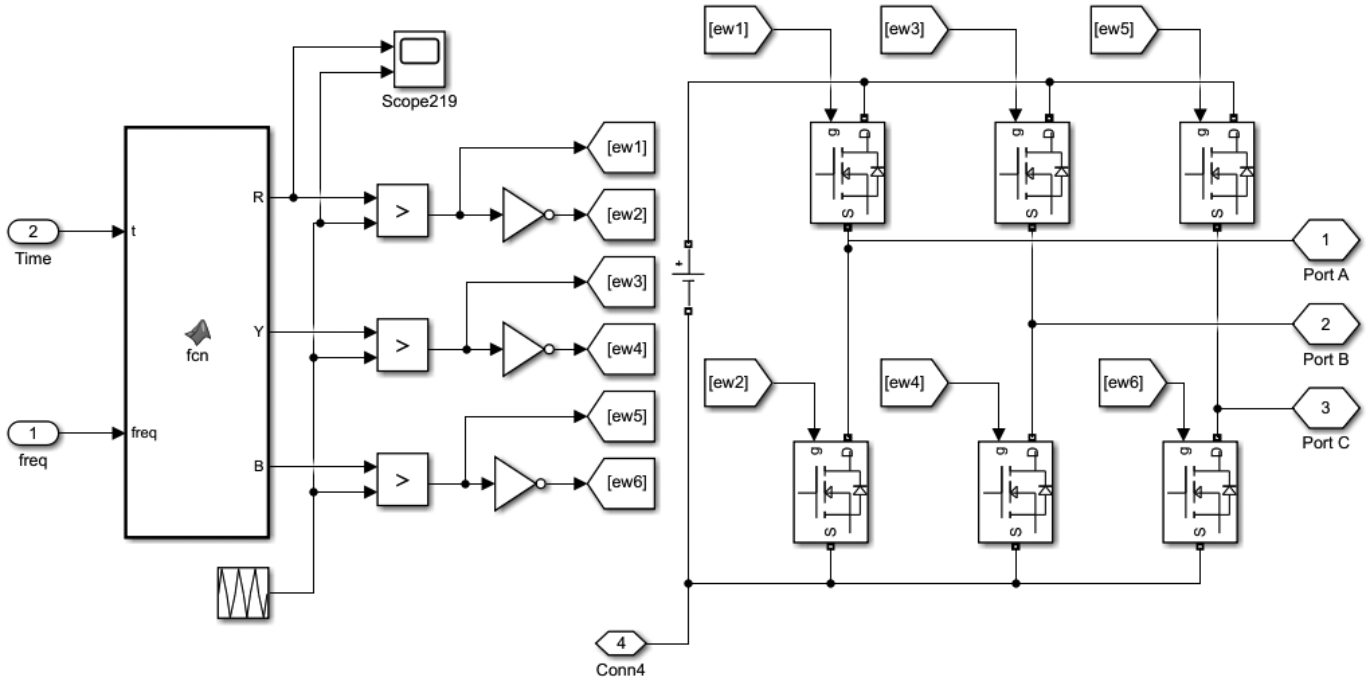


Рис. 2. Схема преобразователя частоты в Simulink

вых токов и перегрузок двигателя на период пуска; отсутствие дополнительных потерь при регулировании; уменьшение механического износа и увеличение срока службы оборудования; снижение затрат на его обслуживание и ремонт. ПЧ строится с использованием транзисторов с изолированным затвором (IGBT).

В ПЧ входное напряжение 220/380 В, с частотой 50 Гц преобразуется в выходное импульсное напряжение посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ), которая формирует в обмотках двигателя синусоидальный ток частотой от 0 до 400 Гц. Увеличением частоты и амплитуды напряжения, подаваемого на обмотки асинхронного двигателя, обеспечивается плавное регулирование скорости вращения вала электродвигателя. Для обеспечения высокой жесткости механической характеристики двигателя и достаточной перегрузочной способности необходимо одновременно с частотой тока регулировать напряжение так, чтобы магнитный поток оставался постоянным [6]. Отсутствие необходимости в электрическом торможении и реверсе привода упрощает структуру ПЧ и позволяет выполнить его на базе автономного инвертора напряжения. При изменении частоты вращения вала двигателя новая рабочая точка располагается в зоне устойчивой работы насоса, и при этом КПД не превышает 0,9 максимального значения. При изменении частоты напряжение изменяется так, чтобы отношение максимального момента двигателя к моменту сопротивления на его валу было постоянным [7]. При постоянстве перегрузочной способности номинальные коэффициенты мощности и КПД двигателя на всем диапазоне регулирования частоты вращения практически не изменяются. Энергия, потребляемая электроприводом, пропорциональна частоте вращения в третьей степени; отсюда следует, что если в процессе управления производительностью частота напряжения снижается, например, с 50 до 40 Гц, то потребление энергии уменьшается почти в 2 раза.

Для анализа стационарных режимов асинхронный двигатель (АД) может быть представлен передаточной функцией, связывающей электромагнитный момент и скорость. В модели ПЧ с ШИМ выделяются следующие ключевые блоки:

- генератор пилообразных импульсов несущей частоты;
- формирователь трехфазных опорных сигналов (sin и cos);
- выходной каскад (инвертор), коммутирующий ключи (IGBT или GTO) по законам ШИМ.

3. Модель механической части

Момент сопротивления на валу двигателя, создаваемый центробежным насосом, имеет квадратичную зависимость от частоты вращения:

$$M_c = M_{c0} + k_{\text{нас}} \cdot \omega^2,$$

где $k_{\text{нас}}$ — коэффициент аппроксимации нагрузки насоса.

Модель трубопровода учитывает гидравлическое сопротивление, которое также пропорционально квадрату расхода (скорости вращения).

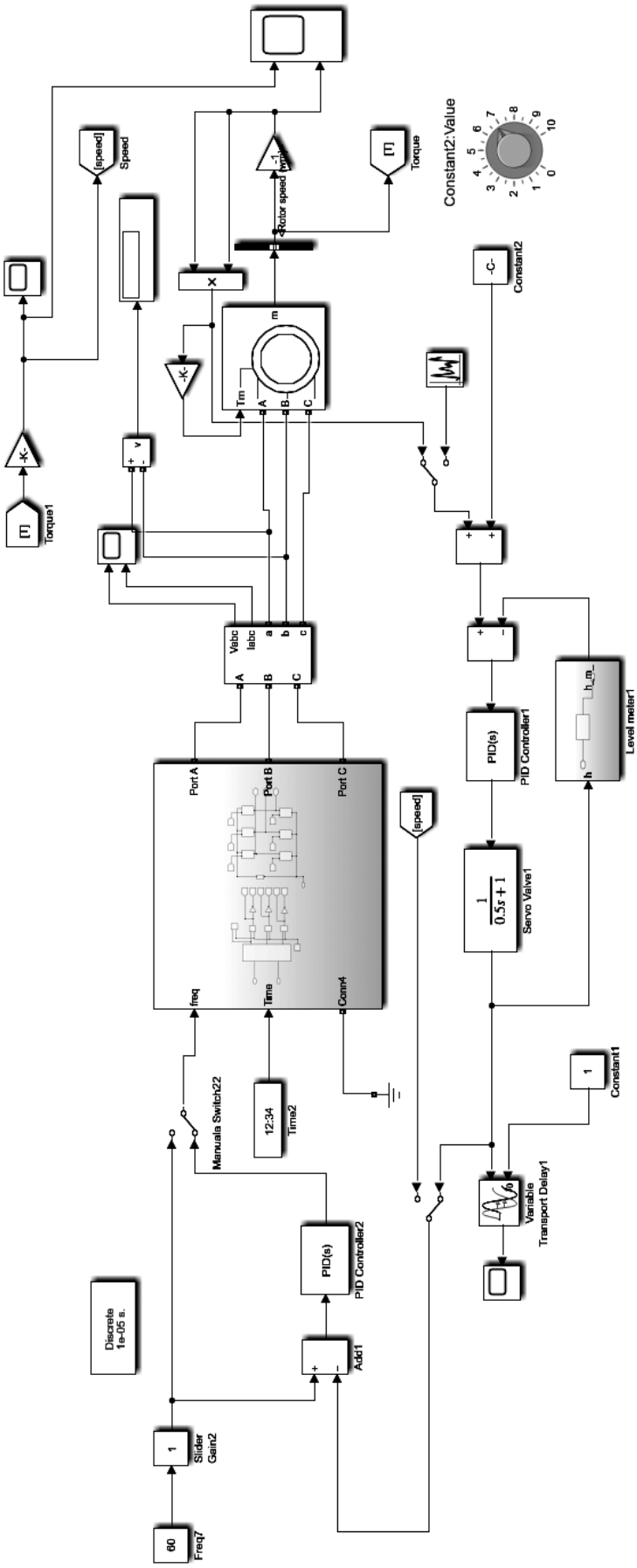


Рис. 3. Структурная схема насосной установки в Simulink

Результаты моделирования переходных процессов

Для анализа динамических режимов работы насосного агрегата была разработана имитационная модель в пакете Matlab/Simulink (рис. 3). Модель включает в себя модели ПЧ, асинхронного двигателя, насоса и трубопровода, а также реализованные регуляторы тока и скорости.

На рисунке 4 представлены осциллограммы переходных процессов, полученные в результате моделирования с фиксированным шагом. Моделирование позволило получить следующие результаты:

1. **Пуск и разгон:** осуществляется плавный разгон двигателя с вентиляторной нагрузкой до номинальной скорости в течение 1,5 с. Скачок электромагнитного момента не превышает критических значений, что исключает гидравлический удар в трубопроводе. Давление в системе плавно нарастает до номинальных 5,8 МПа.
2. **Реакция на возмущения:** при моделировании наброса и сброса давления (имитация открытия/закрытия задвижки или изменения уровня) система автоматического регулирования отрабатывает возмущение примерно за 1 с. ПИД-регулятор (П-регулятор скорости и ПИ-регулятор тока) обеспечивает возврат давления к заданному значению без статической ошибки и с допустимым перерегулированием.

Аппаратная реализация: Преобразователь частоты PowerFlex 7000

В качестве базового элемента системы управления насосом хвостохранилища предлагается использовать высоковольтный преобразователь частоты PowerFlex 7000 (производства Rockwell Automation или аналог). Его характеристики соответствуют требованиям промышленных объектов с напряжением питания 6 кВ.

В табл. 1 приведены основные параметры системы регулирования.

Таблица 1.

Основные параметры системы регулирования

Наименование	Значение
Питание	3 фазы, 6 кВ, 50 Гц
Выход	Регулируемое напряжение 0...6 кВ, частота 0...50 Гц
Перегрузочная способность	110 % в течение 120 с
КПД	0,97
Коэффициент мощности на входе	0,95

Заключение

В работе исследована система частотно-регулируемого электропривода насосного агрегата хвостохранилища ГОК «Катока» с применением ПИД-регулятора. Обоснована эффективность скалярного управления по закону U/f = const с квадратичной характеристикой для центробежных насосов, обеспечивающего снижение энергопотребления на 35–50 % за счёт исключения дросселирования и работы в зоне максимального КПД.

Анализ функционала современных ПЧ (встроенный ПИД, веерный режим, подхват, пропускаемые часто-

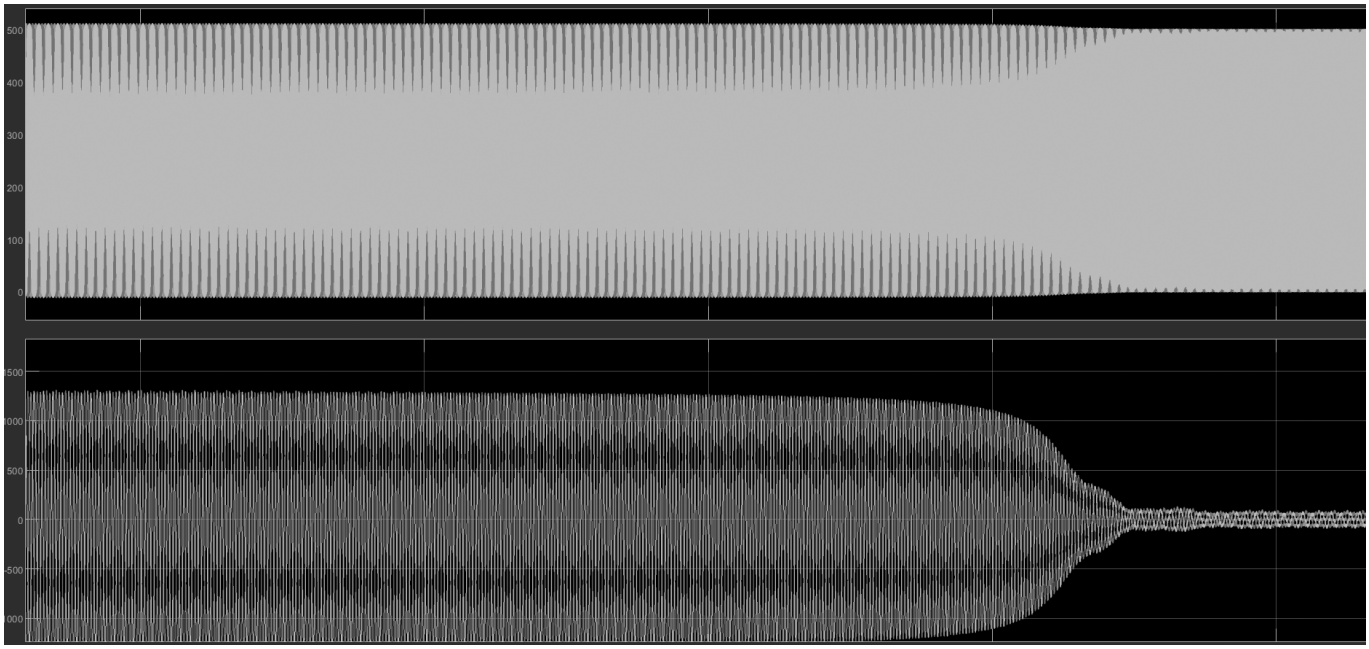


Рис. 4. Переходные процессы в режиме пуска, разгона и внешнего воздействия

ты, автоперезапуск) подтвердил их критическую роль в обеспечении надёжности, минимизации гидроударов и продления ресурса оборудования.

Получены передаточные функции ПИ-регулятора тока и П-регулятора скорости на ОУ, разработана и верифицирована в Matlab/Simulink имитационная модель «ПЧ — АД — насос — трубопровод». Моделирование показало: плавный пуск за ~1,5 с без перегрузки момента, отработку возмущений по давлению за ~1 с без статической ошибки и с приемлемым перерегулированием.

В качестве базового оборудования рекомендован высоковольтный ПЧ PowerFlex 7000 (Rockwell Automation, 6 кВ) с КПД >97 %, перегрузочной способностью 110 % и модульной конструкцией, обеспечивающий высокую надёжность в тяжёлых условиях. Внедрение такой системы позволит существенно снизить эксплуатационные затраты, повысить энергоэффективность и экологическую безопасность гидротранспорта хвостов.

Перспективы: переход к векторному управлению, каскадное управление группой насосов, алгоритмы диагностики по данным ПЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кобелев Д.П. Модернизация автоматизированной системы управления дожимной насосной станции: бакалаврская работа / Д.П. Кобелев; науч. рук. С.В. Леонов. — Томск: ТПУ, 2022. — URL: http://earchive.tpu.ru/handle/11683/71875 (дата обращения: 14.03.2026).
2. Коваленко В.Н. О преобразователях частоты для погружных насосов скважинных водозаборов систем водоснабжения / В.Н. Коваленко, Б.Н. Житенев // Инженерно-экологические аспекты и перспективы развития систем водоснабжения и водоотведения : сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных, Брест, 28 марта 2024 г. — Брест : БрГТУ, 2024. — С. 57–60. — URL: https://rep.bstu.by/handle/data/42892 (дата обращения: 14.03.2026).
3. Bordeasu D. Adaptive Control Strategy for a Pumping System Using a Variable Frequency Drive / D. Bordeasu, O. Prostean, I. Filip, C. Vasar // Machines. — 2023. — Vol. 11, № 7. — P. 688. — URL: https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/4bENRVa7/ (date of access: 14.03.2026).
4. Controlling flow rate and fluid level by variable frequency drive unit // Biblioteka Nauki. — URL: https://bibliotekanauki.pl/articles/140084 (date of access: 14.03.2026).
5. Стариков А.В. Обоснование целесообразности применения частотных преобразователей в станциях управления погружными центробежными насосами / А.В. Стариков, А.А. Казанцев, И.А. Косорлуков // Вестник Самарского государственного технического университета. — 2022. — Т. 30, № 4. — С. 115–126.
6. Шубладзе А.М. Обзор работы ПИ— и ПИД-регуляторов в режимах интегрального насыщения / А.М. Шубладзе, С.В. Гуляев, С.И. Кузнецов [и др.] // Автоматизация в промышленности. — 2008. — № 8. — С. 6–9. — URL: https://www.ipu.rssi.ru/node/4976 (дата обращения: 14.03.2026).
7. Решения Atlas Copco для перекачки воды в шахтных хвостах // Atlas Copco. — URL: https://www.atlascopco.com/ru-uz/construction-equipment/industry/mining-industry/mine-tailings (дата обращения: 14.03.2026).

© Тшипунгу Эдуарду Афонсу (tchipungo369@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.03

МУЦИНОЗНАЯ АДЕНОКАРЦИНОМА СИГМОВИДНОЙ КИШКИ С BRAF V600E МУТАЦИЕЙ У ПАЦИЕНТА МОЛОДОГО ВОЗРАСТА: ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ УЗИ И ОСЛОЖНЕННОЕ ПОСЛЕОПЕРАЦИОННОЕ ТЕЧЕНИЕ

MUCINOUS ADENOCARCINOMA OF THE SIGMOID COLON WITH BRAF V600E MUTATION IN A YOUNG PATIENT: DIAGNOSTIC SIGNIFICANCE OF ULTRASOUND AND COMPLICATED POSTOPERATIVE COURSE

Kh. Bakhtarova
A. Dadayev
R. Bersanov
M. Madaeva
E. Dadaeva

Summary. Colorectal cancer (CRC) in patients under 40 years of age is relatively rare; however, it is characterized by a more aggressive course and an unfavorable molecular genetic profile.

This article presents a clinical case of a 29-year-old patient with newly diagnosed mucinous adenocarcinoma of the sigmoid colon, stage IIIb (pT4aN1bM0), with a BRAF V600E mutation and a microsatellite-stable (MSS) phenotype. A distinctive feature of this case is the onset of the disease masquerading as a respiratory infection, with no classic intestinal symptoms.

Ultrasound (US) played a key diagnostic role, being the first imaging modality to detect a space-occupying lesion in the anterior abdominal wall. The postoperative course was complicated by anastomotic leakage with signs of local peritonitis, necessitating relaparotomy and the formation of a loop transverse colostomy.

Histological examination confirmed mucinous adenocarcinoma with invasion of the visceral peritoneum and involvement of regional lymph nodes (2/58). The patient was prescribed adjuvant polychemotherapy according to the XELOX/FOLFOX regimen.

This case demonstrates the need for vigilance regarding CRC in young patients, the importance of ultrasound as a primary diagnostic tool, and the complexities of managing postoperative complications in locally advanced disease.

Keywords: Colorectal cancer, mucinous adenocarcinoma, BRAF V600E, young adult, ultrasound diagnostics, anastomotic leakage, adjuvant chemotherapy.

Бахтарова Хава Хам-Пашаевна
Врач ФКУЗ «МСЧ МВД России по Чеченской Республике» (г. Грозный)
bakhtarova89@bk.ru
Дадаев Адлан Ярасханович
доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник, Комплексный научно-исследовательский институт Российской Академии Наук (г. Грозный)
doctor_day@mail.ru
Берсанов Руслан Увайсович
доктор медицинских наук, главный научный сотрудник Комплексного научно-исследовательского института Российской Академии Наук (г. Грозный)
bersanovr@mail.ru
Мадаева Малика Супьяновна
Преподаватель, Чеченский государственный университет (г. Грозный)
Malika.s.madaeva@gmail.com
Дадаева Элина Адлановна
Ассистент, Чеченский государственный университет (г. Грозный)
elina.dadaeva.2017@mail.ru

Аннотация. Колоректальный рак (КРР) у пациентов моложе 40 лет встречается относительно редко, однако характеризуется более агрессивным течением и неблагоприятным молекулярно-генетическим профилем. Представлен клинический случай пациента 29 лет с впервые выявленной муцинозной аденокарциномой сигмовидной кишки стадии IIIb (pT4aN1bM0) с мутацией BRAF V600E, MSI-стабильным фенотипом. Особенностью случая является дебют заболевания под маской респираторной инфекции с отсутствием классических кишечных симптомов. Ключевую диагностическую роль сыграло ультразвуковое исследование (УЗИ), которое первым выявило объемное образование передней брюшной стенки. В послеоперационном периоде развилась несостоятельность анастомоза с явлениями местного перитонита, потребовавшая релапаротомии и формирования петлевой трансверзостомы. Гистологическое исследование подтвердило муцинозную аденокарциному с прорастанием висцеральной брюшины и поражением регионарных лимфатических узлов (2/58). Пациенту назначена адъювантная полихимиотерапия по схеме XELOX/FOLFOX. Случай демонстрирует необходимость настороженности в отношении КРР у молодых пациентов, важность УЗИ как первичного диагностического метода и сложности ведения послеоперационных осложнений при местнораспространенном процессе.

Ключевые слова: колоректальный рак, муцинозная аденокарцинома, BRAF V600E, молодой возраст, УЗИ-диагностика, несостоятельность анастомоза, адъювантная химиотерапия.

Введение

Колоректальный рак традиционно считается заболеванием пожилого возраста, однако в последние десятилетия наблюдается тенденция к омоложению контингента пациентов. По данным эпидемиологических исследований, частота КРР у лиц моложе 40 лет составляет от 2 % до 8 % всех случаев, причем у этой группы пациентов заболевание чаще диагностируется на поздних стадиях и имеет менее благоприятный прогноз [1, 2].

Особый интерес представляют молекулярно-генетические подтипы КРР, ассоциированные с агрессивным течением. Мутация BRAF V600E, выявляемая примерно у 8–12 % пациентов с КРР, связана с более высокой частотой метастазирования, резистентностью к стандартной химиотерапии и худшей общей выживаемостью [3, 4]. MSI-стабильный фенотип в сочетании с BRAF-мутацией дополнительно ухудшает прогноз, ограничивая возможности иммунотерапии.

Диагностика КРР у молодых пациентов нередко затруднена ввиду неспецифичности клинической картины и отсутствия «красных флагов» на начальных этапах. В представленном случае именно УЗИ органов брюшной полости стало первым инструментальным методом, позволившим заподозрить онкологический процесс, что подчеркивает важность этого доступного и неинвазивного метода в первичной диагностике.

Описание клинического случая

Пациент мужского пола, 29 лет, обратился в поликлинику ФКУЗ «МСЧ МВД России по Чеченской Республике» с жалобами на общую слабость, боли в затылочной области, непродуктивный кашель, повышение температуры тела до субфебрильных значений, учащенное мочеиспускание и боли в поясничной области. Из анамнеза: указанные жалобы появились в декабре 2025 года. Первоначально состояние расценивалось как респираторная инфекция. При проведении МРТ органов брюшной полости и забрюшинного пространства (27.01.2026 г.) данных за неопластический процесс не получено.

Наследственный анамнез не отягощен. Гепатиты В и С, туберкулез, венерические заболевания отрицает. Гемотрансфузий и оперативных вмешательств в анамнезе не было. Вредные привычки отрицает.

Данные объективного осмотра

Общее состояние расценено как относительно удовлетворительное. Обращали на себя внимание бледность кожных покровов и видимых слизистых. При аускультации легких — везикулярное дыхание, хрипы не выслушивались. Тоны сердца ясные, ритмичные. Артериальное давление 120/80 мм рт.ст., частота сердечных сокращений 78 уд/мин, частота дыхательных движений 18/мин. Язык сухой, обложен белым налетом. Живот при пальпации мягкий, умеренно болезненный в эпигастрии. Печень и селезенка не увеличены. Симптом поколачивания отрицательный с обеих сторон. Стул неустойчивый, диурез учащен. Отеков не отмечалось.

Лабораторные данные

При лабораторном обследовании выявлены признаки анемии легкой степени тяжести: гемоглобин — 97 г/л, эритроциты — $3{,}9\times10^{12}$/л. Лейкоцитоз — $21{,}1\times10^{9}$/л, СОЭ — 65 мм/ч. В биохимическом анализе крови показатели функции печени и почек в пределах референсных значений: общий белок — 74,3 г/л, креатинин — 86,7 мкмоль/л, АЛТ — 20 ед/л, АСТ — 21 ед/л. Онкомаркеры: CEA — 194 нг/мл (норма до 5,0 нг/мл), CA 19-9 — 10,32 Ед/мл (норма до 26,0 Ед/мл), ПСА — 0,781 нг/мл (норма до 4,0 нг/мл).

Маркеры инфекций (ВИЧ, гепатиты В и С, сифилис) отрицательные. ПЦР на COVID-19 отрицательный. Коагулограмма: ПТИ — 87 %, МНО — 0,99, АЧТВ — 31 сек, фибриноген — 63 г/л.

Инструментальная диагностика

УЗИ органов брюшной полости и почек (30.01.2026): в проекции передней брюшной стенки в надлобковой области лоцируется объемное образование. Также выявлены микролиты почек.

МРТ органов брюшной полости и забрюшинного пространства с контрастированием (27.01.2026): данных за наличие неопластического процесса не получено, отмечена умеренно выраженная гепатомегалия.

КТ органов брюшной полости (30.01.2026): выявлены признаки внутрипросветного образования сигмовидной кишки размерами 91×86 мм с вовлечением регионарных лимфатических узлов. Определяется долихосигма.

Колоноскопия (02.02.2026): на протяжении 40–50 см от ануса определяется экзофитно растущая опухоль с элементами распада, практически обтурирующая просвет кишки. Выполнена биопсия.

Гистологическое исследование биоптатов (06.02.2026): аденокарцинома толстой кишки G2.

МРТ малого таза с контрастированием (20.02.2026): внутрипросветное образование сигмовидной кишки размерами 87×66 мм, протяженностью до 104 мм, с признаками ограничения диффузии и неоднородным нако-

плением контрастного препарата. Определяются множественные увеличенные регионарные лимфатические узлы размерами до 10×7 мм.

Остеосцинтиграфия (25.02.2026): данных за вторичное поражение костей не получено.

Онкогенетическое исследование (16.02.2026): выявлена мутация в V600E в гене BRAF, мутации генов KRAS и NRAS не обнаружены, микросателлитная нестабильность (MSI) отсутствует.

Клинический диагноз

На основании комплекса клинических, лабораторных и инструментальных данных установлен диагноз:

- Основной: злокачественное новообразование сигмовидной кишки (аденокарцинома), стадия IIIb (pT4aN1bM0), МКБ-10: C18.7.
- Сопутствующий: анемия легкой степени тяжести (D50), очаговый поверхностный гастрит (K29.6).

Лечение и течение заболевания

Первый этап хирургического лечения

05.03.2026 выполнена операция: лапаротомия, резекция сигмовидной кишки с мобилизацией левого изгиба, дренирование брюшной полости. Интраоперационно выполнена лимфодиссекция в объеме, адекватном стадии процесса.

Послеоперационное осложнение

На третьи сутки после операции (08.03.2026) у пациента отмечено вздутие живота, появление опалесцирующей примеси в отделяемом по дренажу из малого таза, резкое повышение уровня лейкоцитов крови (до $25{,}6\times10^9$/л). Выполнена КТ органов брюшной полости, выявившая картину пневмоперитонеума.

Диагностирована несостоятельность десцендо-ректоанастомоза с развитием местного серозно-фибринозного перитонита (K65.0).

Второй этап хирургического лечения

В экстренном порядке 08.03.2026 выполнена релапаротомия, ревизия и санация брюшной полости, ушивание перфоративного отверстия анастомоза, формирование петлевой трансверзостомии, дренирование брюшной полости.

В послеоперационном периоде у пациента также отмечались явления гастростаза (K91.1), купированные консервативной терапией (метоклопрамид, прозерин). Проводилась интенсивная инфузионная, антибактериальная (ципрофлоксацин 400 мг × 3 р/сут, метронидазол 500 мг × 3 р/сут в течение 10 дней) и симптоматическая терапия. Суммарная доза антибиотиков составила: ципрофлоксацин — 12 г, метронидазол — 15 г.

Гистологическое исследование операционного материала

При плановом гистологическом исследовании (16.03.2026) получено заключение:

- Код МКБ-10: C18.7
- Онкошифр: 8480/3
- Диагноз: высокодифференцированная (G1, low grade) муцинозная аденокарцинома сигмовидной кишки с прорастанием висцеральной брюшины, гнойно-воспалительными изменениями
- Стадия: pT4aN1b (2 из 58 лимфатических узлов поражены)
- Дополнительные параметры: L1 V0 Pn1 R0

Результаты лечения

Воспалительный и болевой синдромы купированы. Послеоперационная рана зажила первичным натяжением, швы сняты. Колостома функционирует адекватно. Пациент выписан в удовлетворительном состоянии 20.03.2026 (32-й день госпитализации).

План дальнейшего лечения

На консультации онколога (17.03.2026) принято решение о проведении адъювантной полихимиотерапии в течение 6 месяцев по схеме XELOX (капецитабин + оксалиплатин) или FOLFOX (фторурацил + лейковорин + оксалиплатин). Ориентировочная дата начала лечения — 06.04.2026.

Пациенту рекомендованы:

- Диета №15 с частым дробным питанием
- Ношение абдоминального бандажа в течение 1 месяца
- Ограничение физических нагрузок на 3 месяца
- Наблюдение хирургом и онкологом по месту жительства

Обсуждение

Представленный клинический случай иллюстрирует несколько ключевых проблем современной онкологии: диагностика колоректального рака у пациентов молодого возраста, роль УЗИ как первичного скринингового метода, особенности молекулярно-генетического профиля агрессивных форм КРР и сложности ведения послеоперационных осложнений при местнораспространенном процессе.

Колоректальный рак у молодых пациентов

Частота КРР у лиц моложе 40 лет, по данным различных авторов, варьирует от 2 % до 8 % [1]. У пациентов данной возрастной группы заболевание чаще диагностируется на поздних стадиях (III–IV), что связывают с низкой онкологической настороженностью врачей первичного звена и отсутствием скрининговых программ для данной возрастной когорты [5]. В представленном случае дебют заболевания протекал под маской респираторной инфекции с неспецифическими жалобами (слабость, субфебрилитет, кашель), что привело к задержке диагностики. Лишь при появлении симптомов со стороны мочевыделительной системы и болевого синдрома было выполнено УЗИ, позволившее визуализировать объемное образование.

Диагностическая значимость УЗИ

УЗИ органов брюшной полости является доступным, неинвазивным и высокоинформативным методом первичной диагностики. Несмотря на то, что «золотым стандартом» верификации КРР остается колоноскопия с биопсией, УЗИ может выступать в роли метода первичного скрининга, особенно у пациентов с неспецифической симптоматикой [6]. В данном случае именно УЗИ первым выявило объемное образование передней брюшной стенки, что стало отправной точкой для дальнейшего углубленного обследования. Обращает на себя внимание, что МРТ с контрастированием, выполненная ранее, не выявила неопластического процесса, что подчеркивает важность комплексного подхода к лучевой диагностике.

Молекулярно-генетический профиль и прогноз

Выявление мутации BRAF V600E является неблагоприятным прогностическим фактором при КРР. Пациенты с BRAF-мутантными опухолями имеют более высокий риск метастазирования, худшую ответную реакцию на стандартную химиотерапию и сниженную общую выживаемость по сравнению с BRAF-диким типом [3, 4]. Частота BRAF V600E мутаций выше среди пациентов с правой локализацией опухоли и муцинозным гистотипом, что соответствует данным литературы.

Отсутствие микросателлитной нестабильности (MSI-стабильный фенотип) дополнительно ограничивает возможности применения иммунотерапии, которая в последние годы показала высокую эффективность при MSI-высоких опухолях [7]. Таким образом, для данного пациента основным методом системной терапии остается адъювантная полихимиотерапия.

Муцинозная аденокарцинома

Муцинозный гистотип (код МКБ-О 8480/3) характеризуется продукцией внеклеточной слизи, составляющей более 50 % объема опухоли. Данный подтип ассоциирован с более агрессивным течением, более частым лимфогенным метастазированием и худшим прогнозом по сравнению с аденокарциномой обычного типа [8]. В представленном случае гистологическое исследование подтвердило муцинозный вариант аденокарциномы с прорастанием висцеральной брюшины (pT4a) и наличием регионарных метастазов (N1b).

Послеоперационные осложнения

Несостоятельность анастомоза является одним из наиболее тяжелых осложнений после резекции толстой кишки, частота которого, по данным литературы, составляет от 3 % до 15 % [9]. В данном случае развитие осложнения на третьи сутки после операции потребовало экстренной релапаротомии. Формирование петлевой трансверзостомы позволило отключить несостоятельный анастомоз и создать условия для его заживления.

Важно отметить, что наличие местнораспространенного процесса (pT4a) и воспалительных изменений в зоне анастомоза являются факторами риска развития несостоятельности [10]. Ведение такого пациента требует мультидисциплинарного подхода с участием хирурга, онколога, анестезиолога-реаниматолога.

Адъювантная химиотерапия

Назначение адъювантной полихимиотерапии при стадии IIIb КРР является стандартом лечения и позволяет снизить риск рецидива на 30–50 % [11]. Схемы XELOX и FOLFOX имеют сопоставимую эффективность, выбор между ними определяется индивидуальными особенностями пациента (предпочтительный режим введения, переносимость, сопутствующие заболевания) [12]. Учитывая молодой возраст пациента и удовлетворительный функциональный статус, проведение полного курса адъювантной химиотерапии является обоснованным и необходимым.

Заключение

Представленный клинический случай демонстрирует сложности диагностики и лечения колоректального рака у пациента молодого возраста с агрессивным молекулярно-генетическим профилем. Ключевые выводы:

1. Колоректальный рак может манифестировать у пациентов младше 30 лет с неспецифической симптоматикой, не характерной для поражения кишечника. Врачам первичного звена необходимо сохранять онкологическую настороженность даже при отсутствии классических кишечных симптомов.
2. УЗИ органов брюшной полости является эффективным методом первичной диагностики, способ-

ным выявить объемное образование на ранних этапах. В данном случае именно УЗИ, а не МРТ, позволило верифицировать патологический очаг.
3. Молекулярно-генетическое профилирование обязательно для всех пациентов с КРР, поскольку определяет прогноз и выбор тактики лечения. Мутация BRAF V600E и MSI-стабильный фенотип ассоциированы с агрессивным течением и требуют более интенсивной адъювантной терапии.
4. Осложненное послеоперационное течение при местнораспространенном процессе требует готовности к экстренному повторному вмешательству. Формирование отключающей стомы позволяет купировать осложнение и сохранить радикальность выполненной операции.
5. Адъювантная полихимиотерапия является обязательным компонентом лечения при стадии IIIb КРР, особенно у пациентов молодого возраста с неблагоприятными прогностическими факторами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю благодарность медицинскому персоналу колопроктологического отделения ФКУЗ «ГКГ МВД России» г. Москвы за высокий профессионализм в ведении данного пациента.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информированное согласие: получено информированное согласие пациента на публикацию клинического случая в обезличенной форме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Siegel RL, Torre LA, Soerjomataram I, et al. Global patterns and trends in colorectal cancer incidence in young adults. Gut. 2019;68(12):2179–2185.
2. Stoffel EM, Murphy CC. Epidemiology and mechanisms of the increasing incidence of colon and rectal cancers in young adults. Gastroenterology. 2020;158(2):341–353.
3. Jones JC, Renfro LA, Al-Shamsi HO, et al. (Non-)metastatic BRAF V600E mutant colorectal cancer: a distinct clinical entity. J Clin Oncol. 2017;35(15_suppl):3544.
4. Van Cutsem E, Cervantes A, Adam R, et al. ESMO consensus guidelines for the management of patients with metastatic colorectal cancer. Ann Oncol. 2016;27(8):1386–1422.
5. O'Connell JB, Maggard MA, Liu JH, et al. Colorectal cancer in the young. Am J Surg. 2004;187(3):343–348.
6. Pox CP, Schmiegel W. Colorectal cancer screening. Dtsch Arztebl Int. 2008;105(18):333–340.
7. André T, Shiu KK, Kim TW, et al. Pembrolizumab versus chemotherapy for microsatellite instability-high/mismatch repair-deficient metastatic colorectal cancer: KEYNOTE-177 study. J Clin Oncol. 2020;38(15_suppl):LBA4.
8. Hugen N, van de Velde CJ, de Wilt JH, Nagtegaal ID. Metastatic pattern in colorectal cancer is strongly influenced by histological subtype. Ann Oncol. 2014;25(3):651–657.
9. McDermott FD, Heeney A, Kelly ME, et al. Systematic review of preoperative, intraoperative and postoperative risk factors for colorectal anastomotic leaks. Br J Surg. 2015;102(5):462–479.
10. Bakker IS, Grossmann I, Henneman D, et al. Risk factors for anastomotic leakage after total mesorectal excision. Colorectal Dis. 2014;16(8):O293–O299.
11. André T, Boni C, Navarro M, et al. Improved overall survival with oxaliplatin, fluorouracil, and leucovorin as adjuvant treatment in stage II or III colon cancer. J Clin Oncol. 2009;27(19):3109–3116.
12. Schmoll HJ, Tabernero J, Maroun J, et al. Capecitabine plus oxaliplatin compared with fluorouracil/leucovorin as adjuvant therapy for stage III colon cancer: final results of the NO16968 trial. J Clin Oncol. 2015;33(32):3733–3740.

© Бахтарова Хава Хам-Пашаевна (bakhtarova89@bk.ru); Дадаев Адлан Ярасханович (doctor_day@mail.ru);
Берсанов Руслан Увайсович (bersanovr@mail.ru); Мадаева Малика Супьяновна (Malika.s.madaeva@gmail.com);
Дадаева Элина Адлановна (elina.dadaeva.2017@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.07

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧРЕСКОЖНЫХ МЕТОДОВ ХИРУРГИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ НЕПАРАЗИТАРНЫХ КИСТ ПЕЧЕНИ

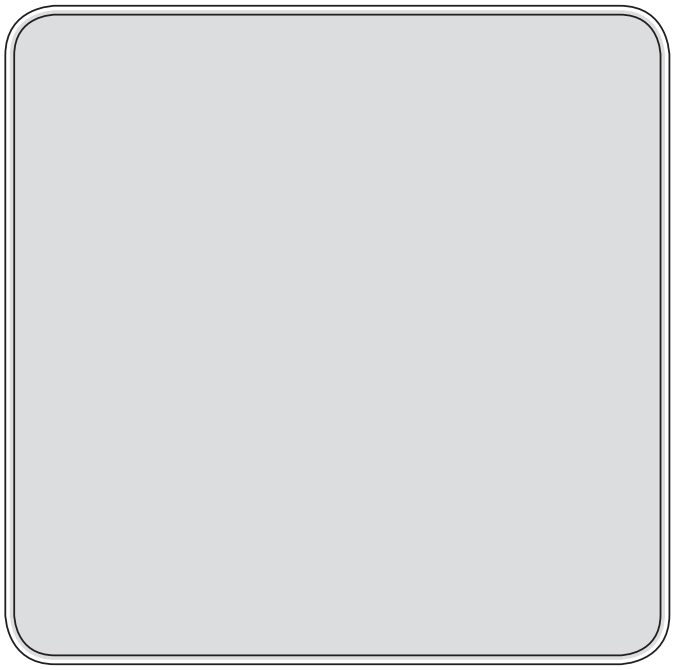
COMPARISON ANALISYS OF PERCUTANEOUS TECHNIQUES FOR NON-PARASITIC LIVER CYSTS

F. Vetshev
A. Egorov
G. Zhemerikin
K. Russkova
Yihan Yang

Summary. Minimally invasive techniques, including percutaneous drainage with sclerotherapy (DS) and thermal ablation, particularly microwave ablation (MWA), are considered promising approaches for the treatment of non-parasitic liver cysts (NPLCs), although the efficacy and safety of MWA require further investigation. We performed a comparative analysis of MWA and DS in the treatment of NPLCs. The study included 105 patients treated at the N.N. Burdenko Faculty Surgery Clinic, Sechenov University. Depending on the treatment strategy (MWA or DS), the patients were divided into two groups. The follow-up period was 60 months. The presence of a residual cavity (RC), its volume, and the rates of recurrence and complications were assessed. Statistical analysis was performed using IBM SPSS Statistics, version 22. During the first year of follow-up, the MWA group demonstrated a faster reduction in RC volume (p=0.03); after one year, RC was detected in a smaller number of patients (p=0.04). At 36 and 60 months, the differences between the groups were not statistically significant, nor were the recurrence and complication rates (p>0.05). Thus, MWA is an effective treatment option for NPLCs, with a safety profile comparable to that of DS.

Keywords: non-parasitic liver cysts, minimally invasive surgery, percutaneous drainage with sclerotherapy, microwave ablation.

Ветшев Федор Петрович
доктор медицинских наук, доцент, Институт клинической медицины имени Н.В. Склифосовского; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), город Москва
vetshev_f_p@staff.sechenov.ru
Егоров Алексей Викторович
доктор медицинских наук, профессор, Институт клинической медицины имени Н.В. Склифосовского; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), город Москва
egorov_a_v@staff.sechenov.ru
Жемерикин Глеб Александрович
кандидат медицинских наук, доцент, Институт клинической медицины имени Н.В. Склифосовского; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), город Москва
zhemerikin_g_a@staff.sechenov.ru
Русскова Ксения Сергеевна
кандидат медицинских наук, ассистент, Институт клинической медицины имени Н.В. Склифосовского; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), город Москва, Российская Федерация
russkova_k_s@staff.sechenov.ru
Ян Ихань
Аспирант, Институт клинической медицины имени Н.В. Склифосовского; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), город Москва, Российская Федерация
1340137655@qq.com



Аннотация. Перспективными в лечении непаразитарных кист печени (НКП) являются минимально инвазивные технологии: чрескожное дренирование и склерозирование (ДС), термическая абляция, в частности, микроволновая абляция (МВА), эффективность и безопасность которой требует дальнейшего изучения. Нами проведен сравнительный анализ МВА и ДС в лечении НКП. В исследование включено 105 пациентов Клиники факультетской хирургии им. Н.Н. Бурденко Сеченовского Университета в период 2014–2025 гг. На основании тактики лечения (МВА или ДС) было сформировано две группы. Период наблюдения составил 60 месяцев. Оценивали наличие остаточной полости (ОП), ее объем, частоту рецидивов и осложнений. Статистическую обработку выполняли с помощью IBM SPSS Statistics v.22. В течение первого года наблюдения в группе МВА зафиксировано более быстрое уменьшение объема ОП (p=0,03), через год ОП определялась у меньшего количества пациентов (p=0,04), через 36 и 60 месяцев различия между группами не были статистически значимы, как и частота рецидивов и осложнений (p>0,05). Таким образом, МВА является эффективным методом лечения НКП при сопоставимом с ДС профиле безопасности.

Ключевые слова: непаразитарные кисты печени, мини-инвазивная хирургия, чрескожное дренирование и склерозирование, микроволновая абляция.

Введение

Одними из наиболее распространенных доброкачественных образований печени являются непаразитарные кисты (НКП), частота встречаемости которых достигает 20 % [1,2]. В большинстве случаев для НКП характерно бессимптомное течение, однако при размерах кист более 5 см, перерастяжении капсулы печени и сдавлении кистой протоковых и сосудистых структур появляются значимые клинические симптомы [3,4]. В ряде случаев возможно развитие осложнений, таких как разрыв кисты, кровоизлияние и инфицирование, что несомненно требует хирургического вмешательства, однако оптимальная тактика лечения НКП остается предметом дискуссий [5,6]. Традиционные методы лечения (резекция печени и фенестрация) уступают место минимально инвазивным технологиям, поскольку их применение ассоциировано со значительно меньшей частотой послеоперационных осложнений, быстрой реабилитацией, также возможно выполнение оперативного лечения под местной анестезией [7]. В последние годы для лечения НКП широко применяют чрескожное дренирование со склерозированием (ДС) под контролем УЗИ и рентгеноскопии [8,9]. Набирают популярность термические методы абляции, в частности, микроволновая абляция (МВА), чья эффективность и безопасность требуют дальнейшего изучения [10,11].

Цель исследования

Провести сравнительный анализ эффективности и безопасности чрескожных хирургических методов лечения (микроволновой абляции и дренирования со склерозированием) в лечении пациентов с НКП.

Материалы и методы

В одноцентровое контролируемое проспективно-ретроспективное исследование включено 105 пациентов с НКП, проходивших лечение на базе Клиники факультетской хирургии им. Н.Н. Бурденко Сеченовского Университета с 2016 по 2025 гг. В зависимости от тактики лечения (МВА или ДС) пациенты были разделены на две группы: первая группа (МВА) включала 51 пациента, вторая (ДС) — 54 пациента. Средний возраст больных в первой группе составил 50,4±16,6 лет, во второй группе — 55,4±14,4 лет. Соотношение мужчин и женщин составляло 22 %/78 % и 17 %/83 % в первой и второй группе соответственно. Как в первой, так и во второй группе более чем у 80 % больных диагностированы единичные кисты правой доли печени. Всем больным до и после лечения, помимо рутинных лабораторных и инструментальных обследований, выполняли ультразвуковое исследование (УЗИ), компьютерную или магнитно-резонансную томографию (КТ/МРТ) органов брюшной полости. Период наблюдения за пациентами составил 60 месяцев, контрольные обследования проводили через 3, 6, 12, 36 и 60 месяцев после лечения. При динамическом наблюдении оценивали выраженность клинических симптомов, наличие остаточной полости, ее объем, частоту рецидивов и осложнений. Помимо объема остаточной полости рассчитывали коэффициент уменьшения объема кисты (КУО) на каждом сроке наблюдения (t) по формуле: КУО(t) = (V0 – Vt) / V0 × 100 %, где V0 — исходный

объем НКП до лечения, Vt — объем остаточной полости на момент динамического наблюдения t. Эффективным считали значение КУО≥80 %. Статистическую обработку выполняли с использованием программного обеспечения IBM SPSS Statistics v.22, для анализа применяли χ^2-тест, точный критерий Фишера для категориальных переменных и t-критерий для непрерывных, различия считали статистически значимыми при p<0,05.

Результаты исследования

Анализируя динамику клинических симптомов у пациентов с НКП, было выявлено, что более чем у 90 % пациентов первой и второй группы имеющаяся до лечения симптоматика регрессировала в первые месяцы после выписки из стационара и не проявлялась при дальнейшем наблюдении (p<0,01). Структура диагностированных до лечения клинических проявлений заболевания у пациентов первой и второй группы представлена в Таблице 1.

Таблица 1.

Клинические проявления непаразитарных кист печени у больных первой и второй группы

Симптомы заболевания	Группы больных	
	Первая группа (n=51)	Вторая группа (n=54)
Дискомфорт в правом подреберье	52 %	48 %
Тошнота	18 %	20 %
Болевой синдром	22 %	28 %
Гепатомегалия	37 %	35 %
Желтуха	2 %	2 %
Портальная гипертензия	–	2 %
Бессимптомное течение	45 %	48 %

Основную область интереса представляла динамика уменьшения объема остаточной полости на основании КУО. До лечения средний объем кисты в первой группе составил 248,4±363,9 мл, во второй — 268,3±230,7. Статистически значимые различия отмечены через 3 и 6 месяцев после проведенного лечения в первой группе больных — после проведенной МВА уменьшение объема остаточной полости более чем на 80 % зафиксировано у достоверно большего количества пациентов, чем в группе ДС (через 3 месяца — 66 % против 46 % больных, через 6 месяцев — 94 % против 76 % больных). При дальнейшем наблюдении показатели были сопоставимы как у пациентов после выполненной микроволновой абляции, так и после чрескожного дренирования со склерозированием, количество больных, достигших эффективного КУО составило более 90 % в обеих группах (Таблица 2).

Таблица 2.

Количество больных с КУО ≥80 % в первой и второй группе

Срок наблюдения	Первая группа (n=51)	Вторая группа (n=54)	p
3 месяца	33/50 (66 %)	25/54 (46 %)	0,04
6 месяцев	46/49 (94 %)	41/54 (76 %)	0,01
12 месяцев	46/48 (96 %)	48/52 (92 %)	0,68
36 месяцев	44/45 (98 %)	41/41 (100 %)	1,00
60 месяцев	34/39 (100 %)	34/34 (100 %)	1,00

Помимо КУО непаразитарных кист печени оценивали динамику регрессии остаточной полости. Согласно литературным данным, данный показатель целесообразно оценивать не ранее, чем через 12 месяцев после проведенного лечения. Через 1 год после выполненной МВА наличие остаточной полости диагностировано у достоверно меньшего количества пациентов в сравнении с группой ДС. В дальнейшем, через 36 и 60 месяцев, данный показатель не имел статистически значимых различий между первой и второй группой больных (Таблица 3).

Таблица 3.

Наличие остаточной полости после лечения у пациентов первой и второй группы

Срок наблюдения	Первая группа (n=51)	Вторая группа (n=54)	p
12 месяцев	30/50 (60 %)	42/54 (78 %)	0,03
36 месяцев	18/49 (37 %)	23/46 (50 %)	0,22
60 месяцев	7/39 (18 %)	10/34 (29 %)	0,28

Оценивая частоту рецидивов заболевания, достоверных различий между группами микроволновой абляции и чрескожного дренирования со склерозированием получено не было. В первой группе больных зафиксировано 2 случая рецидива (4 %), подтвержденных данными инструментального исследования, во второй группе — 5 (9 %), результаты были сопоставимы между группами (p=1,0). В группе МВА пациентам была выполнена лапароскопическая фенестрация рецидивных НКП, в группе ДС двум больным выполнили МВА, трем — лапароскопическую фенестрацию с положительным эффектом.

Анализируя частоту и структуру осложнений, также не было выявлено статистически значимых различий между группами пациентов. Так, частота осложнений в первой группе составила 5,9 % (3 из 51), во второй — 5,6 % (3 из 54) (p=1,0). Структура осложнений представлена в Таблице 4.

Таблица 4.

Структура осложнений у пациентов первой и второй группы

Срок наблюдения	Первая группа (n=51)	Вторая группа (n=54)	p
Абсцесс	1 (1,96 %)	1 (1,86 %)	
Гематома	1 (1,96 %)	1 (1,86 %)	1,0
Кровотечение	–	1 (1,86 %)	
Билома	1 (1,96 %)	–	

Заключение

Опираясь на полученные результаты, можно сделать вывод о том, что микроволновая абляция позволяет более эффективно достичь регрессии остаточной полости в сравнении с чрескожным дренированием со склерозированием при сопоставимой частоте рецидивов и осложнений. Таким образом, микроволновая абляция может быть рекомендована как эффективный и безопасный минимально инвазивный метод хирургического лечения пациентов с НКП.

ЛИТЕРАТУРА

1. European Association for the Study of the Liver. EASL Clinical Practice Guidelines on the management of cystic liver diseases. J Hepatol. 2022 Oct;77(4):1083–1108. doi: 10.1016/j.jhep.2022.06.002
2. Masyuk TV, Masyuk AI, LaRusso NF. Polycystic Liver Disease: Advances in Understanding and Treatment. Annu Rev Pathol. 2022 Jan 24;17:251–269. doi: 10.1146/annurev-pathol-042320-121247.
3. Gartland R.M., Landino S.M., Liang N.E., Day C.J., Berger D.L. Obstructive Jaundice Secondary to Peribiliary Cyst Within the Common Hepatic Duct. Am Surg. 2023;89(3):478–480. doi: 10.1177/0003134820973359. PMID: 33283523.
4. Mavilia M.G., Pakala T., Molina M., Wu G.Y. Differentiating Cystic Liver Lesions: A Review of Imaging Modalities, Diagnosis and Management. J Clin Transl Hepatol. 2018;6(2):208–216. doi: 10.14218/JCTH.2017.00069.
5. Nassar A., Conticchio M., Lardinois M. J., Benedetti J., Lartigau L., Marchese U., Tzedakis S., Fuks D. Prophylactic surgery for hepatic and biliary tumors. Bull Cancer. 2025;112(3):270–276. doi: 10.1016/j.bulcan.2024.04.015. PMID: 38937178.
6. Копытин И.А., Иванов В.В., Филимонов В.Б., Журавлёв Г.Ю., Фомин В.С., Абрамов И.В. Современные аспекты непаразитарных кист печени. Вестник Авиценны. 2025; 25 (3):390–399. doi: 10.25005/2074-0581-2023-25-3-390-399
7. Furumaya A., van Rosmalen B.V., de Graeff J.J., Haring M.P.D., de Meijer V.E., van Gulik T.M., Verheij J., Besselink M.G., van Delden O.M., Erdmann J.I.; Dutch Benign Liver Tumor Group. Systematic review on percutaneous aspiration and sclerotherapy versus surgery in symptomatic simple hepatic cysts. HPB (Oxford). 2021;23(1):11–24. doi: 10.1016/j.hpb.2020.07.005
8. Neijenhuis M.K., Wijnands T.F.M., Kievit W., Ronot M., Gevers T.J.G., Drenth J.P.H. Symptom relief and not cyst reduction determines treatment success in aspiration sclerotherapy of hepatic cysts. Eur Radiol. 2019;29(6):3062–3068. doi: 10.1007/s00330-018-5851-y
9. Ogawa K., Kamimura K., Ishii S., Endo S., Ishikawa N., Abe H., Sakamaki A., Terai S. A case of long-term efficacy of minocycline hydrochloride sclerotherapy combined with intra-cystic lavage for a symptomatic giant liver cyst. The Japanese journal of gastro-enterology. 2024;121(9):769–776.doi: 10.11405/nisshoshi.121.769
10. Черкасов М.Ф., Абоян И.А., Абоян М.Е., Рошак Б.В., Маликов Л.Л., Ханамирова Л.З., Бухарбаев Р.М., Фролова Г.В., Меликова С.Г. Радиочастотная абляция при простых непаразитарных кистах печени. Анналы хирургической гепатологии. 2020;25(2):86–99. https://doi.org/10.16931/1995-5464.2020286-99
11. Karpova R.V., Petrenko D.A., Saribekian A.G., Vedernikov A.A., Magomedagaev M.M., Gorbunov A.S., Shiryaev A.A., Rybin V.K., Chernousov K.F. Microwave ablation of hepatic cyst: A case report. Ann Med Surg (Lond). 2020;61:13–15 doi: 10.1016/j.amsu.2020.11.058

© Ветшев Федор Петрович (vetshev_f_p@staff.sechenov.ru); Егоров Алексей Викторович (egorov_a_v@staff.sechenov.ru); Жемерикин Глеб Александрович (zhemerikin_g_a@staff.sechenov.ru); Русскова Ксения Сергеевна (russkova_k_s@staff.sechenov.ru); Ян Ихань (1340137655@qq.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.09

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОГРЕССИРОВАНИЕ МИОМЫ МАТКИ У ЖЕНЩИН РЕПРОДУКТИВНОГО ВОЗРАСТА

FACTORS INFLUENCING THE PROGRESSION OF UTERINE FIBROIDS IN WOMEN OF REPRODUCTIVE AGE

Yu. Guley
Yu. Sidorova
L. Davidyan

Summary. Uterine fibroids are benign tumors that affect women's fertility and are therefore a socially significant problem. Progressive fibroids are characterized by active growth. The analysis of fibroid progression risk factors is an important scientific issue. Within the framework of this study, the risk factors for the active growth of uterine fibroids in women of reproductive age were studied in detail. It was revealed that the persistence of E.coli in the vagina is a significant risk factor for the progression of uterine fibroids. Another factor is obesity.

Keywords: microflora, gynecology, uterine fibroids, vaginal microbiome.

Гулей Юлия Викторовна
Аспирант,
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»
uliagulej@gmail.com
Сидорова Юлия Дмитриевна
Аспирант,
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»
Yulisik2008@yandex.ru
Давидян Лиана Юрьевна
доктор медицинских наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»
dliana2009@mail.ru

Аннотация. Миома матки является доброкачественной опухолью, которая влияет на фертильность женщин, в связи с чем, является социально-значимой проблемой. Прогрессирующая миома характеризуется активным ростом. Анализ факторов риска прогрессирования миомы является важной научной проблемой. В рамках данного исследования детально изучены факторы риска активного роста миомы матки у женщин репродуктивного возраста. Выявлено, что персистирование E.coli в влагалище является достоверным фактором риска прогрессирования миомы матки. Другим фактором является ожирение.

Ключевые слова: микрофлора, гинекология, миома матки, микробиом влагалища.

Введение

Лейомиома матки — доброкачественное заболевание половых органов у женщин фертильного возраста, характеризующееся чрезмерным синтезом соединительнотканного матрикса, представленного нитями коллагена, протеогликана и фибронектина [1]. Этиология образования миомы матки до конца не изучена, хотя присутствуют различные теории патогенеза, в частности, гормональная, иммунная, цитокиновая. Отдельная роль отводится ростовым факторам, вызывающим клеточную пролиферацию [2].

По данным крупных исследований, показано, что важную роль в росте миомы играют естественные киллеры, активность и инвазия которых увеличивается в эндометрии, пораженном лейомиоматозом [3,4]. Одним из механизмов иммунной активации роста миом является низкая экспрессия KIR-рецепторов естественными киллерами[5].

Одним из факторов, являющихся триггером к запуску иммунного механизма роста миом является нарушение микрофлоры, приводящее к повышению ее агрессивности к слизистой, воспалению, активации перекисного окисления липидов, нарастание малонового альдегида и нарушение функции мембран и рецепторов, запускающее пролиферацию клеток [6].

Миома матки является важной социальной проблемой в связи с прогрессирующим «омоложением» данного заболевания (манифестом до 35 лет), сочетающийся с общей тенденцией к увеличению возраста планирования беременности, характерному для многих развитых и развивающихся стран [7]. Так как данное заболевание является одним из факторов маточного бесплодия, улучшение его курабельности является приоритетным направлением современной акушерско-гинекологической службы.

Все больше работ описывает решающую роль микробиоты в запуске иммунных и воспалительных процессов, влияющих на прогрессирование миомы. Однако, в настоящее время нет четкого мнения о том, какие из штаммов являются наиболее агрессивными [8].

Цель данного исследования заключается в изучении влияния микрофлоры на прогрессирующий рост миомы матки.

Материалы и методы

Данное исследование является когортным, в него вошло 29 пациенток, у которых имелись достоверные признаки миомы матки. Пациенты были разделены на 2 группы:

Группа 1 (N=21) — пациентки с прогрессирующей миомой матки

Группа 2 (N= 8) — Пациентки без растущей миомы матки

Под прогрессирующей миомой матки мы подразумевали ее достоверное увеличение в размерах более 50 % в размерах за 12 месяцев, опираясь на критерии, представленные в исследовании С.Н. Буяновой[9].

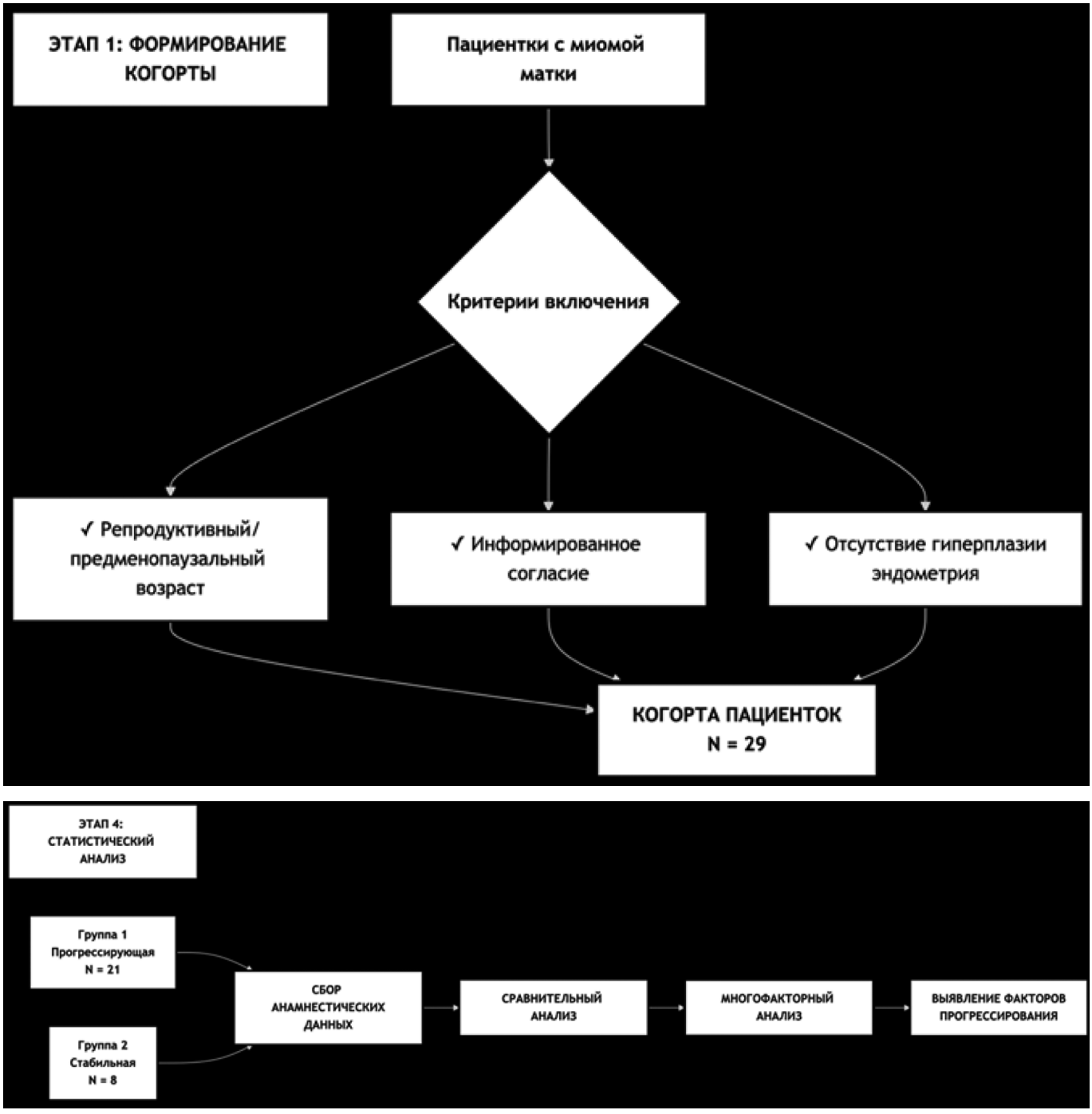


Рис. 1. Дизайн исследования

Критерии включения в исследование:

1. Репродуктивный и предменопаузальный возраст пациенток, включенных в исследование
2. Наличие информированного добровольного согласия на сбор медицинских сведений и использование в научном исследовании
3. Отсутствие гиперпластических явлений эндометрия по данным гистологического исследования или ультразвука.

Критерии исключения:

1. «Ложный» рост миомы
2. Беременность на момент исследования
3. Любые злокачественные новообразования в анамнезе
4. Отказ от участи в исследовании

Данное исследование одобрено локальным этическим комитетом, не противоречит нормам этики и деонтологии (протокол заседания совета по этике №912e7814).

Дизайн исследования представлен двумя этапами

Этап 1 — формирование когорты и этап 2 (рисунок 1).

Методы статистики

Материалы исследования были подвергнуты статистической обработке с использованием методов параметрического и непараметрического анализа. Статистический анализ проводился с использованием свободной программной среды вычислений R (v.3.5.1).

Количественные показатели оценивались на предмет соответствия нормальному распределению, для этого использовался критерий Колмогорова–Смирнова, а также показатели асимметрии и эксцесса. Большинство параметров имело распределение, отличное от нормального, в связи с чем, мы применяли непараметрические критерии оценки.

Для описательной статистики количественных параметров использовали медианные значения с указанием интерквартильного размаха, для описания категориальных переменных использовали абсолютные значения встречаемости с указанием частоты встречаемости в %.

Для сравнения двух независимых выборок использовали непараметрический U-критерий Манна-Уитни для количественных переменных и критерий хи-квадрат Пирсона для категориальных переменных. Для сравнения связанных выборок использовали критерий Уилкоксона. Уровень значимости был принят <0,05.

Результаты и обсуждение

Представляем сравнительную оценку ряда анамнестических показателей в подгруппах с «растущей» и «стабильной миомой» (таблица 1).

Таблица 1.

Оценка качественных и количественных анамнестических показателей в сравниваемых подгруппах

Параметр	Группа 1 (N=21)	Группа 2 (N= 8)	P
Возраст, лет	46[43;50]	51[45;52,25]	0,34
Вес, кг	74[65;100]	76,5[65,75;80,5]	0,17
Рост, см	160[156;165]	161[158;165]	0,2
ИМТ, кг/м^2	28[25,7;32]	27,85[24;31]	0,4
Образование Высшее, N(%) Среднее, N(%)	 6 15	 3 5	–
Без контрацепции, N(%)	11(52 %)	5(62 %)	0,31
Барьерная контрацепция, N(%)	7(33 %)	0(0 %)	0,03
КОК, N(%)	2(10 %)	3(37 %)	0,03
ВМС, N(%)	3(14 %)	0(0 %)	0,13
Аборты, N(%)	3(14 %)	0(0 %)	0,13
Бесплодие, N(%)	0(0 %)	0(0 %)	–
Выкидыши, N(%)	5(24 %)	2(25 %)	0,47
Эктопическая беременность, N(%)	1(5 %)	0(0 %)	0,27
Количество родов	2[1;2]	2[2;2]	0,47
Длительность менструации, дней	5[5;6]	5[5;5,5]	0,3
Средний размер узла	55[40;70]	29[20;40]	0,001
Единичный узел, N(%)	12(57 %)	1(12 %)	0,08
Множественные узлы, N(%)	12(57 %)	4(50 %)	0,32
Субсерозный, N(%)	16(76 %)	3(37 %)	0,17
Субмукозный, N(%)	9(43 %)	7(87 %)	0,02
Интерстициальный, N(%)	13(62 %)	1(12,5 %)	0,005
Положительный мазок из влагалища, N(%)	9(43 %)	3(37 %)	0,39
Положительный мазок из матки, N(%)	1(5 %)	0(0 %)	0,9
Escherichia coli	4(19 %)	1(12 %)	0,34

Параметр	Группа 1 (N=21)	Группа 2 (N= 8)	P
Klebsiella pneumoniae	1(5 %)	1(12 %)	0,27
КНС — коагулазо-негативный	1(5 %)	0(0 %)	0,24
Staphylococcus haemolyticus	1(5 %)	0(0 %)	0,24
Candida krusei	1(5 %)	1(12 %)	0,27

Из таблицы 1 видно, что сравниваемые группы были сопоставимы по антропометрическим и анамнестическим критериям. Барьерная контрацепция в основном использовалась пациентками из группы 1, а КОК — из группы 2. Интерстициальная локализация узла преимущественно наблюдалась в группе 1, а в группе 2 — субмукозная. Средней размер узла был больше в группе прогрессирующей миомы, что объяснялось прогрессированием доброкачественной опухоли.

Многофакторный анализ (таблица 2) показал, что достоверно влияли на рост миомы такие факторы как наличие Escherichia coli в микробиоте, ИМТ более 31. Болезненные менструации, возможно, были ассоциированы с прогрессированием миомы, однако, этот фактор не имел достаточной статистической значимости.

Графическое представление результатов многофакторного анализа представлено на рисунке 2.

Таблица 2.

Многофакторный анализ прогрессирования миомы матки

Фактор	Коэффициент (B)	p-значение	ОШ (95 % ДИ)	Интерпретация
ИМТ	+0.42	0.008	1.52 (1.12–2.08)	ФАКТОР РИСКА
Наличие Escherichia coli в микробиоте	+2.84	0.012	17.1 (1.9–156.3)	ФАКТОР РИСКА
Болезненные менструации	+1.56	0.089	4.76 (0.79–28.6)	Тенденция
Обильные менструации	+1.12	0.152	3.06 (0.65–14.4)	Не значимо
Возраст	−0.08	0.214	0.92 (0.81–1.05)	Не значимо
Количество родов	−0.45	0.231	0.64 (0.31–1.32)	Не значимо
Количество абортов	+0.18	0.342	1.20 (0.82–1.75)	Не значимо
Наличие КОК	−1.02	0.298	0.36 (0.05–2.43)	Не значимо

Таким образом, клинический портрет пациентки с выявленной миомой и высоким риском ее активного роста включает несколько критериев:

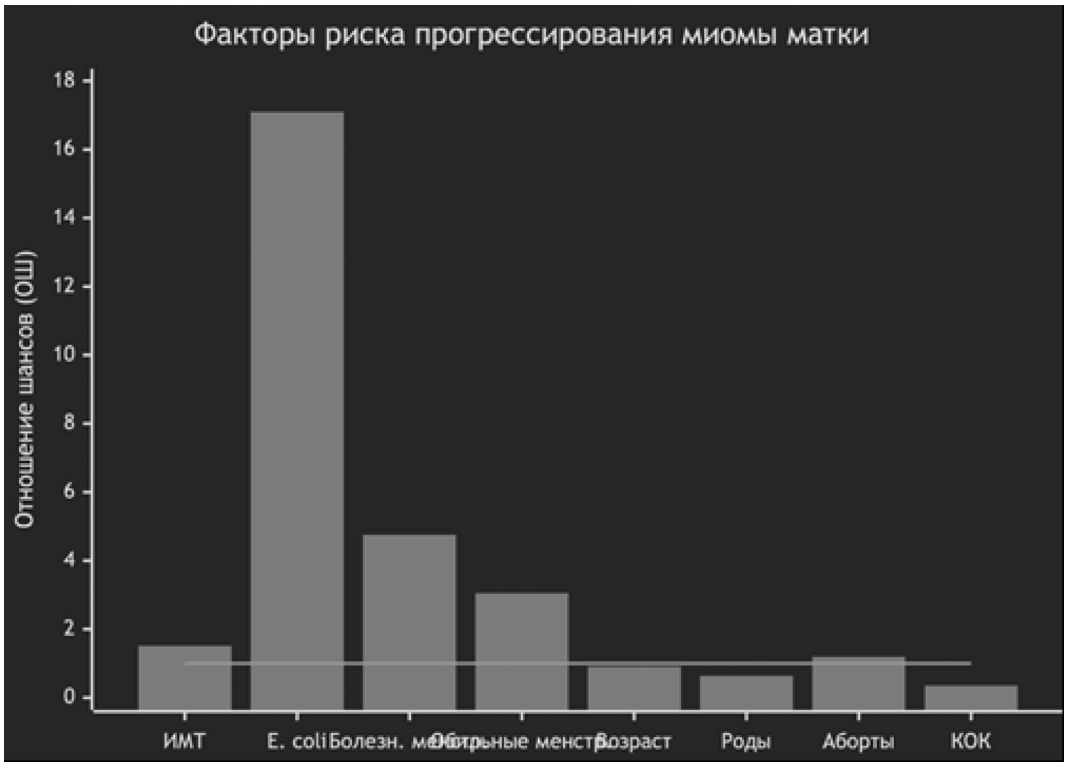


Рис. 2. Факторы прогрессирования миомы

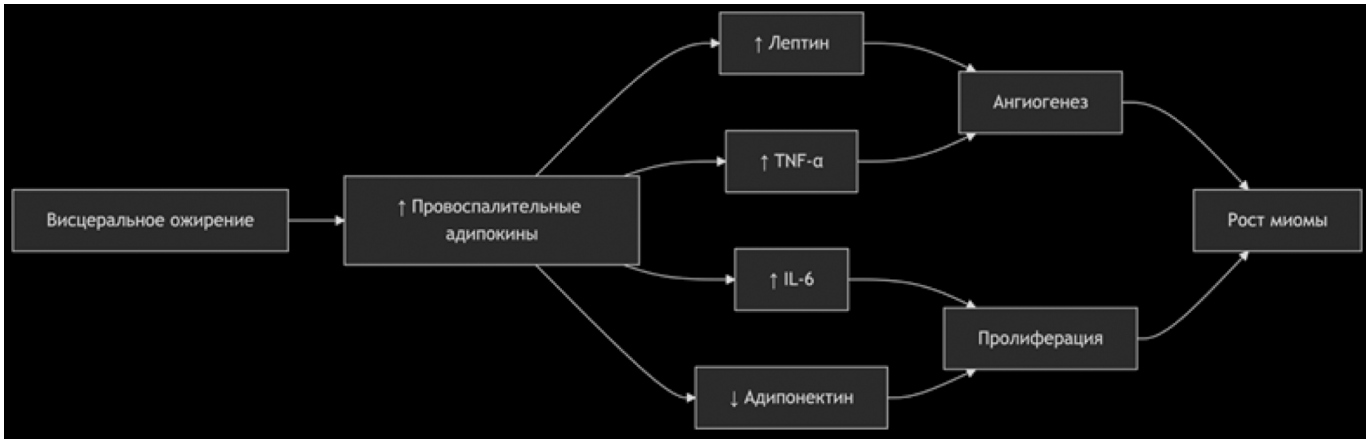


Рис. 3. Рост миомы, ассоциированный с ожирением. Адаптировано [15–16]

1. Персистирование E.coli в микробиоте влагалища
2. Ожирение с ИМТ более 30
3. Болезненные менструации (возможный фактор)

При анализе литературы выявлено, что E.coli может оказывать значимое влияние на прогрессирование миомы матки путем активации хронического воспаления, выделения цитокинов (IL-1β, IL-6, TNF-α) и стимуляции ангиогенеза [10; 11].

Описаны также изменения в иммунной системе, провоцируемы E.coli: макрофагальный сдвиг M1-M2, подавление активности клеток-натуральных киллеров (NK), увеличение регуляторных Т-клеток [12]. Данные механизмы создают иммуносупрессивные и проопухолевые условия, что может ускорить прогрессирование миомы.

Ожирение достоверно ассоциировано с ростом миоматозных узлов [13]. Описано, что жировая ткань содержит фермент ароматазу CYP19A1, конвертирующий андростендион в эстрон, а тестостерон в эстрадиол. С увеличением количества жировой ткани уровень эстрадиола может повышаться в 30–50 % [14]. Миома матки является гормон-зависимой опухолью [15], содержащей в своем составе большое количество рецепторов, реагирующих запуском пролиферации и роста миомы (рисунок 3)

Выводы

В рамках данного исследования выявлено, что персистирование E.coli в влагалище является достоверным фактором риска прогрессирования миомы матки. Другим фактором является ожирение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иммунные механизмы регуляции роста миомы матки. URL: https://urologyjournal.ru/articles/Immunnye-mehanizmy-regulyacii-rosta-miomy-matki.html (дата обращения: 21.02.2026).
2. Malyshkina A.I., Voskresenskaya D.L., Voronin D.N., Antsiferova Yu.S., Sotnikova N.Yu., Malyshkina D.A. Immune mechanisms of regulating the growth of uterine leiomyoma // Obstetrics and Gynecology. 2020. № 2. С. 111–115.
3. Fujisawa C., Castellot J.J. Matrix production and remodeling as therapeutic targets for uterine leiomyoma // J Cell Commun Signal. 2014. Т. 8, № 3. С. 179–194.
4. McWilliams M.M., Chennathukuzhi V.M. Recent Advances in Uterine Fibroid Etiology // Semin Reprod Med. 2017. Т. 35, № 2. С. 181–189.
5. Сотникова Н.Ю., Малышкина Д.А., Воронин Д.Н. Особенности продукции цитокинов, регулирующих активность натуральных киллеров, у женщин с лейомиомой матки // Иммунология. 2023. Т. 44, № 2. С. 202–208.
6. Дикарева Л.В. Способ диагностии быстрорастущей миомы матки: пат. RU2332167C1 USA. 2008.
7. Буянова С.Н., Щукина Н.А., Чечнева М.А., Бабунашвили Е.Л., Юдина Н.В., Гукасян С.А. Атипичная миома матки у молодых женщин: диагностика, лечение, реабилитация // Российский вестник акушера-гинеколога. 2019. №19(6). С. 77–83.
8. Никитина Е.С., Рымашевский А.Н., Набока Ю.Л., Рымашевский М.А., Гудима И.А., Свирава Э.Г. Микробиота влагалища и миоматозных узлов при миоме матки // Медицинский вестник Юга России. 2022. Т. 13, № 2. С. 50–58.
9. Buyanova S.N. и др. Prognostic value of ultrasound study in women with uterine myoma at the stage of pregnancy planning // Ross. vestn. akush.-ginekol. 2016. Т. 16, № 4. С. 61.
10. Pałczyński B. и др. [IL-6 and TNF-alpha levels in oviductal epithelial cells culture after escherichia coli LPS stimulation] // Ginekol Pol. 2001. Т. 72, № 12A. С. 1334–1339.
11. Redenti A. и др. Probiotic neoantigen delivery vectors for precision cancer immunotherapy // Nature. 2024. Т. 635, № 8038. С. 453–461.
12. Zhang Y. и др. Edible bird's nest improves hemorheology and immune function in mice with transplanted uterine leiomyomas // Am J Transl Res. 2024. Т. 16, № 9. С. 5063–5073.

13. Gambioli R. и др. The use of D-chiro-Inositol in clinical practice // Eur Rev Med Pharmacol Sci. 2021. Т. 25, № 1. С. 438–446.
14. Abobeleira J. P. и др. Evidence of Browning and Inflammation Features in Visceral Adipose Tissue of Women with Endometriosis // Arch Med Res. 2024. Т. 55, № 7. С. 103064.
15. Nambu H. и др. Postpartum Expulsion of an Infected Intramural Uterine Myoma: Rapid Growth in Pregnancy and Definitive Management by Abdominal Hysterectomy // Cureus. 2025. Т. 17, № 9. С. e92246.
16. Nowicki M. The influence of luteinizing hormone-releasing hormone analog on serum leptin and body composition in women with solitary uterine myoma // Am J Obstet Gynecol. 2002. Т. 186, № 3. С. 340–344.

© Гулей Юлия Викторовна (uliagulej@gmail.com); Сидорова Юлия Дмитриевна (Yulisik2008@yandex.ru);
Давидян Лиана Юрьевна (dliana2009@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.10

АДАПТИВНЫЙ ИММУНИТЕТ И УРОВЕНЬ КОРТИЗОЛА ПРИ I СТЕПЕНИ ТЯЖЕСТИ СИНДРОМА ДЛИТЕЛЬНОГО СДАВЛЕНИЯ В РАННЕМ ПОСТКОМПРЕССИОННОМ ПЕРИОДЕ

ADAPTIVE IMMUNITY AND CORTISOL LEVELS IN PATIENTS WITH GRADE I SYNDROME OF PROLONGED COMPRESSION IN THE EARLY POST-COMPRESSION PERIOD

A. Dalgatova
N. Fedorova
F. Fedorova
A. Mezhivgadzhieva

Summary. The article examines the pathogenetic significance of changes in adaptive immunity in patients with prolonged compression syndrome of varying severity. Using an experimental model of long-term compression syndrome, changes in adaptive immunity in terms of soluble CD3G and CD19 levels are studied and the degree of stress in experimental animals on cortisol production at grade I severity of long-term compression syndrome is assessed. Pathomorphological changes in lymphoid organs such as the thymus, spleen, Peyer's plaques, lymph nodes and kidneys are also evaluated, the dynamics of soluble CD3G and CD19, TNF–α, IF-γ and IL-6 levels, the number of blood cells, as well as the density of lymphocytes and neutrophils in lymphoid organs in the syndrome of prolonged compression of the first degree of severity are revealed. in the early post-compression period.

Keywords: prolonged compression syndrome, experiment, cortisol, immunity, pro-inflammatory cytokines.

Далгатова Асера Арабханова
Доцент, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет» Минздрава России
asera@internet.ru
Федорова Нурия Якубовна
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет» Минздрава России
Yakub18@mail.ru
Федорова Фарида Алимовна
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет» Минздрава России
phedorova@mail.ru
Межвигаджиева Айшат Расуловна
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет» Минздрава России
Yacubsab1976@mail.ru

Аннотация. В статье изучается патогенетическая значимость изменений адаптивного иммунитета при синдроме длительного сдавления различной степени тяжести. На экспериментальной модели синдрома длительного сдавления изучаются изменения адаптивного иммунитета по уровню растворимых CD3G и CD19 и оценивается степень стресса экспериментальных животных по продукции кортизола при I степени тяжести синдрома длительного сдавления. Также оцениваются патоморфологические изменения в лимфоидных органах — тимусе, селезёнке, пейеровых бляшках, лимфатических узлах и почках, выявляется динамика растворимых CD3G и CD19, уровня ТНФ-α, ИФ-γ и ИЛ-6, количества клеток крови, а также плотности лимфоцитов и нейтрофилов в лимфоидных органах при синдроме длительного сдавления I степени тяжести в раннем посткомпрессионном периоде.

Ключевые слова: синдром длительного сдавления, эксперимент, кортизол, иммунитет, провоспалительные цитокины.

Эксперимент проведен на белых крысах-самцах Вистар 8–12 месячного возраста, массой 150–180 гр. Животные содержались в стандартных условиях и диете в виварии кафедры патофизиологии ДГМУ. В случаях, когда животные болели или подвергались тем или иным травмам, они выводились из эксперимента. Работа с животными проводилась в соответствии с Правилами проведения работ с использованием экспериментальных животных.

Модель СДС воспроизводилась у крыс путём наложения металлических тисков с площадью сдавливающей поверхности 5–6 см^2. Тиски накладывались на 2 часа на задние лапки под тиопенталовым наркозом (0,2–0,3 мл 10 % раствора тиопентала на одну особь). При этом сила сдавливания была максимальной, но не нарушающей целостность костей нижних конечностей. Такая модель является общепринятой и позволяет воспроизводить степень компрессионной травмы. Сдавливание в течение 2 часов отражало I степень тяжести СДС.

Экспериментальные животные были разделены на 2 группы: 1 группа крыс (n=20) с СДС лёгкой степени (I степень тяжести), время сдавливания — 2 часа; 2 контрольная группа крыс (n=10). Животные выводились из эксперимента путём декапитации под наркозом.

Забор крови проводился в пробирку с антикоагулянтом (К2 ЭДТА). Подсчёт общего количества лейкоцитов

проводился с применением стандартной методики, согласно которой, после лизиса эритроцитов 3 % раствором уксусной кислоты и разведения полученной клеточной взвеси 1:20, проводился подсчёт абсолютного числа лейкоцитов в камере Горяева. Относительный уровень нейтрофилов, лимфоцитов, моноцитов и эозинофилов в периферической крови крыс подсчитывался на мазках крови после их окрашивания по Романовскому-Гимза при ув.400. Далее процент клеток пересчитывался в абсолютные величины.

Морфологические исследования

Изучались органы иммунной системы — тимус, селезёнка, пейеровы бляшки и региональные лимфатические узлы, а также почки. После сепарации органов системы иммунитета материал фиксировался в 10 % нейтральном формалине в течение 24 часов. Затем кусочки ткани подвергали спиртовой дегидратации, пропитывали в горячем парафине и заливали в блоки. С блоков готовились 4 мкм гистологические срезы и после депарафинизации окрашивались гематоксилин-эозином. Все полученные препараты были подвергнуты морфометрии. Морфометрические показатели определяли путем подсчета количества нейтрофилов, лимфоцитов и эозинофилов в нескольких полях зрения при ув.400. с выведением средней арифметической. Для подсчета выбирались наиболее типичные для данного препарата поля зрения.

Часть крови экспериментальных животных отбиралась в сухую пробирку. После свертывания крови, пробирки центрифугировались, сыворотка крови отбиралась в отдельную пробирку и хранилась при –20° С до постановки ИФА. Иммуноферментные исследования проводились в строгом соответствии с инструкциями производителя. Все наборы реактивов для ИФА были предназначены для работы только с крысиной сывороткой.

Исследования адаптивного иммунитета

Уровень CD3G в сыворотке крови определяли методом твёрдофазного ИФА на наборах «Rat T-cell surface glycoprotein CD3 gamma chain ELISA Kit» компании «CUSABIO», кат. №CSB-EL004933RA.

Сывороточный уровень CD19 определяли на наборах твёрдофазного ИФА «Rat cluster of differentiation 19 (CD19) ELISA Kit» компании «CUSABIO», кат. №CSB-E14095г.

Исследования уровня кортизола

Уровень кортизола в сыворотке крови определяли на наборах твёрдофазного ИФА «Rat cortisol ELISA Kit» компании «CUSABIO», кат. №CSB-E05112г.

Результаты анализов CD3G, CD19 и кортизола замерялись на многоканальном спектрофотометре Stat Fax 2600, AWRENESS, Technology Inc. USA в двухволновом режиме, основной фильтр — 450 нм, референс-фильтр — 540 или 570 нм, и выражались в нг/мл.

Исследования провоспалительных цитокинов

Сывороточный уровень ТНФ-α определяли на наборах твёрдофазного ИФА «Rat TNF-α ELISA Kit» компании «CUSABIO», кат. №CSB-E11987г.

Сывороточный уровень ИФ-γ определяли на наборах твёрдофазного ИФА «Rat Interferon γ (IFN-γ) ELISA Kit» компании «CUSABIO», кат. №CSB-E04579г.

Сывороточный уровень ИЛ-6 определяли на наборах твёрдофазного ИФА«Rat Interleukin 6 (IL-6) ELISA Kit» компании «CUSABIO», кат. №CSB-E04640г.

Результаты анализов ТНФ-α, ИФ-γ и ИЛ-6 замерялись на многоканальном спектрофотометре Stat Fax 2600, AWRENESS, Technology Inc. USA в двухволновом режиме, основной фильтр — 450 нм, референс-фильтр — 540 или 570 нм, и выражались в пг/мл.

Статистическая обработка полученных результатов

Обработку данных проводили с помощью статистического пакета Statistica (версия 6,0), а также «Biostat 4.03». База данных создавалась с использованием редактора электронных таблиц Microsoft Excel 2007. Непрерывные переменные в исследуемых выборках представлены в виде медианы (Me) с 25;75-процентилями.

Для определения достоверности различий между двумя сравниваемыми выборками использовался критерий Манна-Уитни. При множественных сравнениях использовались критерии Крускала-Уолеса и Данна.

Достоверность отличий определяли по значению p. Различия считали статистически достоверными при уровне значимости $p<0,05$ [1].

При моделировании I степени тяжести СДС все животные после выхода из наркоза в посткомпрессионном периоде остались живы.

I степень тяжести синдрома длительного сдавления (СДС), как указывалось выше, моделировалась путём сдавления нижних лапок крыс в течение 2 часов. Очевидно, что после реперфузии степень эндотоксемии будет минимальной. Но и этого отрезка времени достаточно, чтобы показатели адаптивного иммунитета претерпели существенные изменения. В табл. 1 представ-

лены результаты изучения уровня растворимых CD3G и CD19, а также кортизола, в крови крыс при СДС I степени тяжести.

Таблица 1.

Уровень растворимых CD3 G, CD19 и кортизола в сыворотке крови крыс при СДС I степени тяжести, Me (25;75процентили).

	CD3 G, нг/мл	CD19, нг/мл	Кортизол, нг/мл
I степень СДС, n=20	0,4 (0,2;0,5)*	0,32 (0,2;0,38)*	25,5 (18,9;52)**
Контроль, n=10	0,25 (0,2;0,3)	0,16 (0,1;0,2)	3 (2,5;3,0)

Примечание: *p<0,05, **p<0,01 по сравнению с контрольной группой (Т-критерий Манна-Уитни)

Прежде всего, обращает на себя внимание выраженное, достоверное (p<0,01) увеличение уровня кортизола в сыворотке крови при I степени тяжести СДС по сравнению с контролем — 25,5(18,9;52 нг/мл против 3 (2,5;3,0) нг/мл. Очевидно, что этот факт является отражением стресс-реакции экспериментальных животных на рабдомиолиз. На этом фоне уровни растворимых CD3G и CD19 достоверно (p<0,05) превышали аналогичные показатели в контрольной группе. Факт крайне интересный. Мы определяли сывороточные уровни CD3G и CD19, но не количество клеток, несущих эти маркеры. Сывороточный уровень CD3G и CD19 отражает феномен «сбрасывания» или «шеддинга» этих поверхностных гликопротеинов. Шеддинг таких молекул с поверхности Т- и В-лимфоцитов свидетельствует о транзиторной активации этих клеток вследствие эндотоксикоза с потенциалом аутоиммунного ответа на продукты рабдомиолиза [3,9,10].

Несколько противоречивыми выглядят данные об одновременном повышении уровня кортизола и растворимых CD3G и CD19. Кортизол и его производные являются иммуносупрессорами, а иммуносупрессия сопровождается лимфоцитопенией, включая и субпопуляции Т- и В-лимфоцитов. Однако противоречия в полученных нами результатах нет, поскольку, во первых, мы определяли уровень растворимых CD3G и CD19, но не количество Т- и В-лимфоцитов, во-вторых, рабдомиолиз на ранних стадиях сопровождается транзиторной активацией клеток иммунной системы и, в-третьих, увеличение уровня растворимых CD3G и CD19 обязано, в т. ч. перераспределению лимфоцитов в организме экспериментальных животных. Последний факт подтверждён нашими результатами (см. ниже).

Известно, что активация клеток адаптивного иммунитета сопровождается также усилением продукции цитокинов различных функциональных классов [3,4,5].

Поскольку при СДС процесс воспаления является неотъемлемой частью патогенеза этого состояния, мы изучили продукцию провоспалительных цитокинов при I степени тяжести СДС. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Уровень провоспалительных цитокинов и кортизола в сыворотке крови крыс при СДС I степени тяжести, Me (25;75процентили)

	ТНФ-α, пг/мл	ИФ-γ, пг/мл	ИЛ-6, пг/мл	Кортизол, нг/мл
I степень СДС, n=20	0,73 (0,3;1,5)*	0,97 (0,8;1,2)*	3,4 (2,4;4,2)*	25,5 (18,9;52)**
Контроль, n=10	0,2 (0,14;0,3)	0,7 (0,5;0,9)	2,3 (1,8;2,8)	3 (2,5;3,0)

Примечание: *p<0,05, **p<0,01 по сравнению с контрольной группой (Т-критерий Манна-Уитни)

Видно, что поведение ТНФ-α, ИЛ-6 и ИФ-γ при I степени тяжести СДС однозначно. Уровни всех этих провоспалительных цитокинов в сыворотке крови достоверно (p<0,05) превышают аналогичные показатели в контрольной группе. Представленные данные являются ярким свидетельством активации клеток адаптивного иммунитета уже при I степени тяжести СДС. Одновременно эти цитокины принимают деятельное участие в процессах системного и местного воспаления при компрессионной травме.

Крайне интересен факт синергичного повышения уровней провоспалительных цитокинов, особенно ТНФ-α, и кортизола. Дело в том, что и ТНФ-α, и кортизол являются мощными индукторами апоптоза лимфоцитов [6,7,8]. В наших исследованиях достоверная лимфоцитопения сопутствовала всем степеням тяжести СДС и она может быть объяснена также существенным увеличением сывороточных уровней ТНФ-α и кортизола и индуцированных ими апоптоза лимфоцитов.

Теперь обратимся к результатам количественного перераспределения клеток адаптивного иммунитета в крови и органах иммунной системы при СДС I степени тяжести. Результаты изменений абсолютного количества лейкоцитов и относительного количества ядросодержащих клеток крови представлены в табл. 3.

Обращают на себя внимание следующие факты. Это достоверное (p<0,05) снижение общего количества лейкоцитов по сравнению с контрольной группой — 2,7 (2;3,5) против 6 (3;5,2). Общая лейкоцитопения сопровождается достоверной (p<0,01) лимфоцитопенией (p<0,05). Очевиден решающий вклад лимфоцитопении в это явление. Не менее очевидно, что абсолютная и относительная лимфоцитопения, сопутствующая компрессионной травме, может быть признаком транзиторного иммунодефицита, индуцированного в т. ч. и выбросом корой надпочечников в системную циркуляцию избытка

Таблица 3.

Количество ядросодержащих клеток в крови крыс при СДС I степени тяжести, Me (25;75процентили)

	Общее количество лейкоцитов, тыс./мкл	Лимфоциты, %	Нейтрофилы, %	Эозинофилы, %	Моноциты, %
I степень СДС, n=20	2,7 (2;3,5)*	43 (40;44)**	54 (49;56)**	0	4 (3;6)*
Контроль, n=10	6 (3;5,2)	60 (51;66,7)	31,5 (25;37)	2 (1,2;3)	7,5 (4;8,7)

Примечание: *p<0,05, **p<0,01 по сравнению с контрольной группой (Т-критерий Манна-Уитни)

кортикостероидов (кортизола), как стресс-реакция при СДС. Изменения уровня моноцитов аналогичны. На этом фоне количество нейтрофилов претерпевает противоположные изменения — определяется достоверное (p<0,01) увеличение этих клеток. Последний факт является отражением развивающего воспаления на продукты рабдомиолиза.

Результаты морфометрических исследований органов иммунной системы и почек отражены в табл. 4. Отметим, что подсчёту подвергались лимфоциты и нейтрофилы, поскольку именно эти клетки были превалирующими в клеточных инфильтратах.

Определяется закономерность, состоящая в том, что при I степени тяжести СДС в лимфатических узлах, пейеровых бляшках, селезёнке и тимусе, а также в почках плотность лимфоцитов достоверно превышает аналогичный показатель в контрольной группе (p<0,05, p<0,01).

Очевидно, что компрессионная травма сопровождается реактивным перераспределением лимфоцитов: из периферической крови они депонируются в лимфоидных органах, а также в почках. Этот процесс многофакторный. Во-первых, на фоне выраженного увеличения уровня кортизола в крови при СДС вполне объяснимо выглядит лимфоцитопения (табл. 3) в периферической крови. Стероид-индуцированный апоптоз лимфоцитов — хорошо известное явление. Одновременно, эндотоксикоз при СДС, на фоне сохранённой васкуляризации лимфоидных органов и почек, также способствует перераспределению лимфоцитов из периферической циркуляции в лимфоидную ткань и почки. Будучи активированными, лимфоциты и моноциты, находящиеся в микроокружении лимфоидных органов, ответственны на гиперпродукцию провоспалительных цитокинов (табл. 2). На этом фоне интересно поведение нейтрофилов. Выраженный нейтрофилёз в периферической крови не сопровождается скоплением этих клеток в лимфоидных органах. Как видно из табл. 4 определяются единичные нейтрофилы только в пейеровых бляшках и селезёнке. Однако, эти клетки скапливаются в ткани повреждённых мышц на этапе реваскуляризации, где усиливается их фагоцитарная и микробицидная функции [2].

Патоморфология органов иммунной системы и почек при I степени СДС сводилась к следующим основным изменениям. На рис. 1 представлен препарат лимфатических узлов, а на рис. 2 препарат пейеровых бляшек.

Со стороны лимфатических узлов (рис. 1) отмечалось уменьшение зоны коркового вещества, синусы расширены, заполнены преимущественно зрелыми лимфоцитами с примесью макрофагов и плазматических клеток. В фолликулах отмечается снижение количества зрелых лимфоцитов. Центр фолликула представлен преимущественно ретикулярными клетками и лимфобластами.

В пейеровых бляшках (рис.2) определялось застойное полнокровие сосудов, снижение плотности клеток (зрелых лимфоцитов) в лимфоидных фолликулах, уменьшение количества зрелых лимфоцитов. В зоне купола отмечалось относительное увеличение плазматических клеток.

На рис. 3 представлен типичный препарат селезёнки, а на рис. 4 препарат тимуса.

Таблица 4.

Результаты морфометрических исследований органов иммунной системы и почек у крыс при СДС I степени тяжести, Me (25;75процентили)

	Лимфатические узлы		Пейеровы бляшки		Тимус		Селезёнка		Почки	
	Л	Нф	Л	Нф	Л	Нф	Л	Нф	Л	Нф
I степень СДС, n=20	400 (340;450)**	–	200 (160;275)*	3 (2,5;6,5)	400 (370;540)**	–	260 (200;365)**	4 (2;6)	100 (90;120)**	–
Контроль n=10	230 (202;250)	–	125 (105;145)	–	197 (183;200)	–	110 (100;120)	–	55 (38;60)	–

Примечание: Л — лимфоциты, Нф — нейтрофилы, *p<0,05, **p<0,01 по сравнению с контрольной группой (Т-критерий Манна-Уитни)

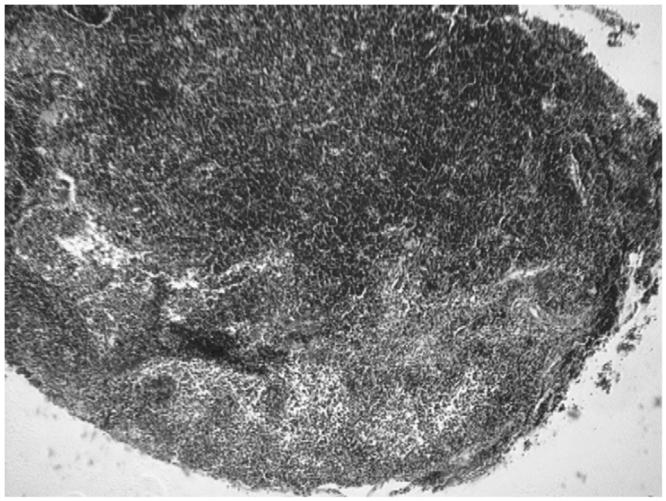


Рис. 1. Лимфатический узел при СДС I степени тяжести, ув. 100

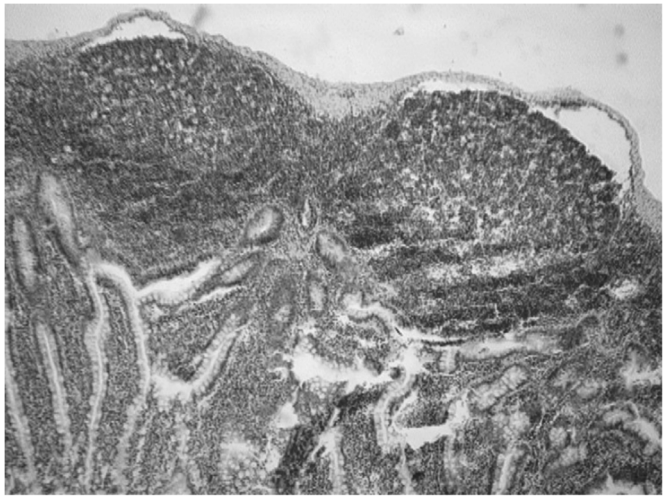


Рис. 2. Пейеровы бляшки при СДС I степени тяжести, ув. 100



Рис. 3. Селезёнка при СДС I степени тяжести, ув. 100

Макроскопически селезёнка увеличена в размерах, выглядит полнокровной, на разрезе хорошо видны фолликулы. В ткани селезенки, рис.3, определяется уменьшение размеров белой пульпы и увеличение доли красной пульпы с ретикулярной гиперплазией и плазматизацией фолликулов. В фолликулах селезенки снижение количества малых лимфоцитов. Сосуды селезенки полнокровны, в красной пульпе отмечается отложение гемосидерина и скопление плазмобластов и макрофагов.

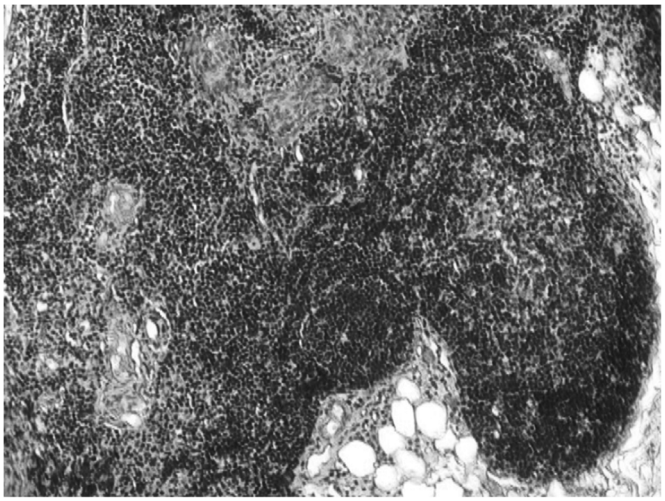


Рис. 4. Тимус при СДС I степени тяжести, ув. 100

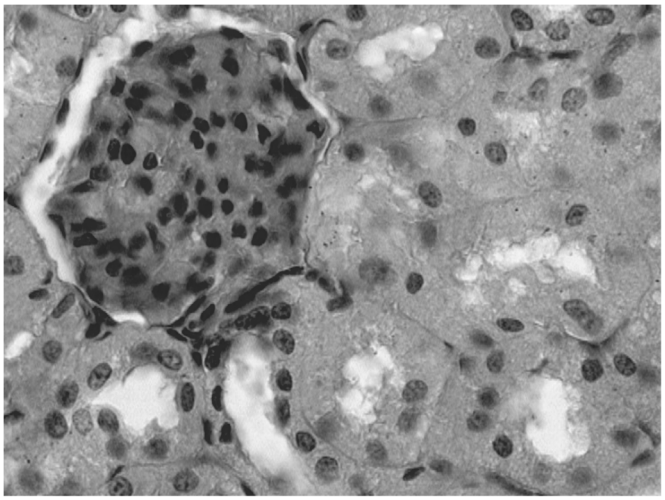


Рис. 5. Почки при СДС I степени тяжести, ув.400

В тимусе, рис. 4, отмечается снижение доли коркового вещества и повышение доли мозгового вещества на 10–12 %. По сравнению с контролем количество малых (зрелых) лимфоцитов уменьшалось. Сосуды полнокровны, структура клеток сохранена. Отмечается дегенерация ретикулоэпителия. Встречается тимические тельца и мелкие фокусы некробиоза.

На рис. 5 представлен препарат почек при СДС I степени тяжести. Макроскопически почки были увеличены, капсула напряжена. Корковый слой резко отличался от темно-красных пирамид. Отмечалось застойное полнокровие сосудов преимущественно венозной интермедиальной зоны и пирамид. Капилляры клубочков находились в спавшемся состоянии. В проксимальных

канальцах местами отмечалось скопление вакуолизированных гомогенных масс с примесью цилиндров. Встречались эпителиоциты в состоянии зернистой дистрофии. Пространство Шумлянского многих почечных телец было сужено. В интерстиции отмечался лимфостаз, преимущественно в интермедиальной зоне.

Таким образом, представленные общие патоморфологические изменения органов системы иммунитета сопутствуют результатам оценки адаптивного иммунитета и уровня кортизола в сыворотке крови при СДС I степени тяжести.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Гланц, Медико-биологическая статистика, «Практика», Москва, 1999; Лакин Г.Ф. Биометрия. — М.: Высшая школа, 1980, 293 с.
2. Дубицкий А.Е., Семенов И.А. Чепкий Л.П. Синдром длительного раздавливания тканей.// Медицина катастроф — 1993— №4 — С. 292–303.
3. Brune I.B., Wilke W., Hensler T., et al. Downregulation of T helper type 1 immune response and altered pro-inflammatory and anti-inflammatory T cell cytokine balance following conventional but not laparoscopic surgery // Am. J. Surg.— 1999 — V.177 — №1 — P.55–60.
4. Collins R.A., Grounds M.D. The role of tumor necrosis factor-alpha (TNF-α) in skeletal muscle regeneration. Studies in TNF-α(−/−) and TNF-α(−/−)/LT-α(−/−) mice // J. Histochem. Cytochem.— 2001 — V.49 — P. 989–1001.
5. Shubayev V.I., Angert M., Dolkas J. et al. TNFα-induced MMP-9 promotes macrophage recruitment into injured peripheral nerve. Molecular and Cellular Neuroscience — 2006 — V.31 — P.407–415.
6. Krüger K., Agnischock S., Lechtermann A. et al. Intensive resistance exercise induces lymphocyte apoptosis via cortisol and glucocorticoid receptor-dependent pathways // J. Appl. Physiol. — 2011 — V.110 — №5 — P.1226–1232.
7. Pervaiz N., Hoffman-Goetz L. Immune cell inflammatory cytokine responses differ between central and systemic compartments in response to acute exercise in mice // Exerc. Immunol. Rev. — 2012 — V.18 — P.142–157.
8. Talaber G., Tuckermann J.P., Okret S. ACTH controls thymocyte homeostasis independent of glucocorticoids // FASEB J. — 2015 — V.29 — №6 — P. 2526–2534.
9. Flohé S.B, Flohé S., Schade F.U. Invited review: deterioration of the immune system after trauma: signals and cellular mechanisms // Innate Immun. — 2008 — V. 14 — №6 — P. 333–344.
10. Kipnis J. et al. Myelin specific Th1 cells are necessary for post-traumatic protective autoimmunity // J. Neuroimmunol. — 2002 — V.130 — №78–85.

© Далгатова Асера Арабханова (asera@internet.ru); Федорова Нурия Якубовна (Yakub18@mail.ru);
Федорова Фарида Алимовна (phedorova@mail.ru); Меживгаджиева Айшат Расуловна (Yacubsab1976@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.11

ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ СОЧЕТАНИЯ КЛИНИЧЕСКИХ ТЕСТОВ И ПУЛЬСОКСИМЕТРИИ ЗУБА ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ОБРАТИМОГО И НЕОБРАТИМОГО ПУЛЬПИТА

PROGNOSTIC VALUE OF COMBINING CLINICAL TESTS AND TOOTH PULSE OXIMETRY IN THE DIAGNOSIS OF REVERSIBLE AND IRREVERSIBLE PULPITIS

M. Dzanbulatov
G. Budaichiev
M. Chavtaraev
U. Magomedova
E. Kurbanova

Summary. The article presents the results of a single-center prospective diagnostic study assessing the prognostic value of combining clinical tests with tooth pulse oximetry for the differential diagnosis of reversible and irreversible pulpitis. A total of 120 patients aged 18–60 years were enrolled; 112 patients were included in the final diagnostic accuracy analysis. The standard clinical diagnostic set showed acceptable but limited accuracy due to overlap in symptoms and sensibility-test results. Tooth pulse oximetry demonstrated high technical applicability (94.9 % among patients who completed follow-up), good reproducibility (ICC=0.91), and significant differences in SpO_2 between groups (91 % [88;94] in reversible pulpitis vs 83 % [79;87] in irreversible pulpitis; p<0.001). Adding SpO_2 to the clinical model significantly improved diagnostic accuracy (AUC 0.944 vs 0.891; p=0.021), while lower SpO_2 remained independently associated with a higher probability of irreversible pulpitis. Tooth pulse oximetry is justified as a diagnostic refinement tool within a combined clinical algorithm, particularly in borderline clinical cases.

Keywords: pulpitis, reversible pulpitis, irreversible pulpitis, tooth pulse oximetry, pulp diagnosis, electric pulp testing.

Джанбулатов Мурат Абдулвагитович
к.м.н., доцент
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный медицинский университет» Минздрава России, Махачкала
Будайчиев Гасан Магомед-Алиевич
к.м.н., доцент
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный медицинский университет» Минздрава России, Махачкала
gasan.budaychiev005@mail.ru
Чавтараев Мурад Магомедович
главный врач
ГБУ РД «Стоматологическая поликлиника №1»
Магомедова Умият Абдулбасировна
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный медицинский университет» Минздрава России, Махачкала
Курбанова Эльмира Абуталибовна
к.м.н., доцент
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный медицинский университет» Минздрава России, Махачкала

Аннотация. В статье представлены результаты одноцентрового проспективного диагностического исследования, направленного на оценку прогностической ценности сочетания клинических тестов и пульсоксиметрии зуба при дифференциальной диагностике обратимого и необратимого пульпита. В исследование включены 120 пациентов 18–60 лет; в итоговый анализ диагностической точности вошли 112 пациентов. Показано, что стандартный клинический диагностический комплекс обеспечивает приемлемую, но ограниченную точность вследствие перекрытия симптомов и результатов sensibility-тестов. Пульсоксиметрия продемонстрировала высокую техническую применимость (94,9 % среди завершивших наблюдение), хорошую воспроизводимость (ICC=0,91) и статистически значимые различия SpO_2 между группами (91 % [88;94] при обратимом и 83 % [79;87] при необратимом пульпите; p<0,001). Добавление SpO_2 к клинической модели достоверно повысило диагностическую точность (AUC 0,944 против 0,891; p=0,021), при этом снижение SpO_2 сохраняло независимую ассоциацию с вероятностью необратимого пульпита. Применение пульсоксиметрии обосновано как метода уточнения диагноза в составе комбинированного алгоритма, особенно в клинически пограничных случаях.

Ключевые слова: пульпит, обратимый пульпит, необратимый пульпит, пульсоксиметрия зуба, диагностика пульпы, электроодонтометрия.

Введение

Дифференциальная диагностика обратимого и необратимого пульпита остается одной из наиболее клинически значимых задач терапевтической стоматологии и эндодонтии, поскольку именно на этом этапе определяется выбор органосохраняющей или эндодонтической тактики лечения [1]. Ошибочная интерпретация состояния пульпы может приводить как к необоснованному эндодонтическому вмешательству, так и к сохранению зуба с воспалением пульпы, не способной к восстановлению, что ухудшает прогноз лечения и увеличивает риск повторных обращений [2]. В рутинной практике диагностика пульпита традиционно основывается на совокупности жалоб, анамнеза, клинического осмотра, термопроб, электроодонтометрии, перкуссии и рентгенологических данных [3]. Однако классические чувствительные (sensibility) тесты оценивают преимущественно реакцию нервных волокон пульпы, а не ее гемодинамический статус, вследствие чего их результаты могут зависеть от субъективного восприятия боли пациентом, уровня тревожности, возраста, степени минерализации тканей зуба и ряда других факторов [4]. В связи с этим проблема диагностической вариабельности и ограниченной воспроизводимости заключений сохраняет актуальность [5]. Современные представления о патологии пульпы подчеркивают клиническую важность более точной оценки жизнеспособности и степени воспалительных изменений пульпарной ткани, что особенно значимо в контексте расширения показаний к витальным методам лечения [6]. В международных клинических рекомендациях и консенсусных документах отмечается необходимость комплексного подхода к диагностике, основанного на сочетании симптоматики, клинических тестов и данных визуализации, однако сохраняется потребность в объективизации диагностических критериев [7]. Пульсоксиметрия зуба рассматривается как потенциально более объективный метод, поскольку позволяет косвенно оценивать пульпарную микроциркуляцию путем регистрации насыщения кислородом гемоглобина в сосудистом русле пульпы [8]. По данным систематических обзоров, пульсоксиметрия демонстрирует перспективные показатели диагностической точности по сравнению с термопробами и электроодонтометрией, однако внедрение метода в широкую клиническую практику ограничено гетерогенностью протоколов, различиями используемых датчиков и отсутствием унифицированных пороговых значений для различных клинических состояний пульпы [9]. Отдельные клинические исследования показали различия уровня пульпарной сатурации кислорода при обратимом и необратимом пульпите, что создает предпосылки для использования пульсоксиметрии не только как теста жизнеспособности, но и как инструмента повышения точности дифференциальной диагностики воспалительных состояний пульпы [10]. Вместе с тем в условиях реального амбулаторного приема остается недостаточно изученным вопрос о добавочной прогностической ценности пульсоксиметрии при ее использовании в сочетании с традиционными клиническими тестами, а не изолированно. Это определяет актуальность настоящего исследования.

Цель исследования — оценить прогностическую ценность сочетания клинических тестов (анамнез, термопробы, перкуссия, электроодонтометрия, клинико-рентгенологические признаки) и пульсоксиметрии зуба для дифференциальной диагностики обратимого и необратимого пульпита.

Материал и методы исследования

Проведено одноцентровое проспективное диагностическое исследование на базе Стоматологической поликлиники №1 города Махачкалы (амбулаторный приём) в период с 01.10.2024 по 31.07.2025. В исследование последовательно включены 120 пациентов в возрасте 18–60 лет с одним причинным постоянным зубом (с завершенным формированием корня), жалобами на боль/гиперестезию и клинико-рентгенологическими признаками поражения твердых тканей, требующими дифференциальной диагностики обратимого и необратимого пульпита. Исследование выполнено в соответствии с принципами Хельсинкской декларации, одобрено локальным этическим комитетом (протокол № 10/24 от 26.09.2024); от всех участников получено информированное добровольное согласие. Критерии включения: возраст 18–60 лет, наличие причинного зуба, возможность выполнения клинических тестов, прицельной рентгенографии/радиовизиографии и пульсоксиметрии, согласие на контрольное наблюдение. Критерии исключения: ранее проведенное эндодонтическое лечение исследуемого зуба, травма зуба в течение последних 12 месяцев, подозрение на синдром треснувшего зуба, признаки некроза пульпы, острых гнойных осложнений или выраженных периапикальных изменений, тяжелый пародонтит в области исследуемого зуба, активное ортодонтическое перемещение зуба, прием анальгетиков менее чем за 6 часов до обследования (при невозможности стандартизации интерпретации болевой реакции), тяжелая сопутствующая патология, затрудняющая участие. До проведения тестов регистрировали пол, возраст, группу зубов, характер и длительность жалоб (реакция на холод/горячее, спонтанная и ночная боль, иррадиация), прием анальгетиков и интенсивность боли по ВАШ (0–10 баллов). Клинический осмотр включал оценку кариозного поражения/реставрации, болезненности при зондировании, вертикальной и горизонтальной перкуссии, пальпации, подвижности зуба и состояния пародонта. Всем пациентам выполняли прицельную рентгенографию (или радиовизиографию) с оценкой глубины поражения, состояния периодонтальной щели

и периапикальных тканей. Холодовую пробу проводили после изоляции и высушивания зуба (хладагент на ватном аппликаторе к вестибулярной поверхности) с регистрацией наличия ответа, латентности и длительности боли после прекращения раздражителя; при необходимости тест повторяли не более 2 раз (интервал не менее 2 минут) с фиксацией воспроизводимого результата. Электроодонтометрию выполняли по стандартной методике с регистрацией порога реакции. Перкуссию и пальпацию оценивали бинарно (болезненность есть/нет). Клинические тесты проводил врач-исследователь 1, не осведомленный о результатах пульсоксиметрии. Пульсоксиметрию проводил врач-исследователь 2 с использованием пульсоксиметра с адаптированным стоматологическим датчиком/держателем. После очищения, изоляции и высушивания зуба выполняли не менее 3 последовательных измерений (интервал 30–60 с); в анализ включали медиану SpO_2 (%) при стабильном сигнале. Для контроля качества сигнала регистрировали показатели на пальце и, по возможности, на интактном симметричном (или аналогичном по группе) зубе. При отсутствии стабильного сигнала после 3 попыток результат считали технически неинтерпретируемым и исключали из анализа диагностической точности, но учитывали при оценке применимости метода. Первичное клиническое заключение (обратимый/необратимый пульпит) формировали по совокупности жалоб, данных осмотра, термопробы, электроодонтометрии и рентгенологических признаков без учета пульсоксиметрии. Затем строили комбинированную диагностическую модель с включением SpO_2 как количественного предиктора. Референсный итоговый диагноз устанавливался комиссией из двух эндодонтистов (при необходимости — с привлечением третьего эксперта) на основании клинико-рентгенологических данных, характера лечения и исхода при контрольном осмотре через 6 недель; решение в спорных случаях принимали консенсусом. Основной исход — точность дифференциальной диагностики обратимого и необратимого пульпита. Первичная конечная точка — площадь под ROC-кривой (AUC) для модели стандартных клинических тестов и комбинированной модели (клинические тесты + пульсоксиметрия) с их сравнением. Вторичные конечные точки: чувствительность, специфичность, PPV, NPV, LR+/LR−, доля правильно классифицированных случаев и оптимальный порог SpO_2 (индекс Юдена); на подвыборке из 30 пациентов оценивали внутриоператорскую повторяемость пульсоксиметрии (ICC).

Статистическую обработку проводили в IBM SPSS Statistics 26.0 и MedCalc 20.2: количественные данные представляли как M±SD или Me [Q1;Q3] (в зависимости от распределения, критерий Шапиро–Уилка), категориальные — как n (%); межгрупповые сравнения выполняли с использованием t-критерия Стьюдента/критерия Манна–Уитни и χ^2-критерия Пирсона/точного критерия Фишера; для оценки добавочной прогностической ценности строили логистическую регрессию (ОШ, 95 % ДИ), AUC сравнивали методом DeLong; уровень значимости — $p<0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

В исследование были последовательно включены 120 пациентов, соответствовавших критериям включения. Двое пациентов не завершили контрольный осмотр через 6 недель, в связи с чем не могли быть отнесены к одной из диагностических категорий по референсному алгоритму и были исключены из итогового анализа диагностической точности. Среди 118 пациентов, завершивших наблюдение, у 6 (5,1 %) не удалось получить стабильный сигнал пульсоксиметрии исследуемого зуба после трех попыток; эти случаи были исключены из анализа диагностической точности, но сохранены в анализе применимости метода. Таким образом, в итоговый анализ диагностической точности вошли 112 пациентов с полным набором клинических данных, результатами пульсоксиметрии и установленным референсным диагнозом. По заключению экспертной комиссии, сформированному с учетом клинико-рентгенологических данных, характера лечения и исхода через 6 недель, обратимый пульпит был подтвержден у 46 (41,1 %) пациентов, необратимый пульпит — у 66 (58,9 %). Средний возраст пациентов составил 36,8±10,9 года; статистически значимых различий по возрасту между группами не выявлено ($p=0,29$). По полу группы также были сопоставимы ($p=0,41$). Наиболее часто исследуемыми зубами были моляры, затем премоляры; различия распределения по группам зубов между обратимым и необратимым пульпитом статистической значимости не достигли ($p=0,18$), что важно для интерпретации диагностической ценности тестов без выраженного смещения по анатомической локализации. Уже на этом этапе следует отметить, что техническая применимость пульсоксиметрии в условиях рутинного приема оказалась высокой (94,9 % среди завершивших наблюдение), однако не абсолютной; технически неинтерпретируемые случаи чаще встречались в жевательной группе зубов и при наличии объемных реставраций, что имеет прямое практическое значение и должно учитываться при внедрении метода в клинический алгоритм, а не рассматриваться как формальный «недостаток аппарата».

Анализ жалоб показал ожидаемое, но клинически неоднозначное распределение признаков. В группе необратимого пульпита существенно чаще регистрировались спонтанная боль (71,2 % против 19,6 %; $p<0,001$), ночная боль (59,1 % против 13,0 %; $p<0,001$), иррадиация боли (42,4 % против 10,9 %; $p<0,001$) и прием анальгетиков до обращения (62,1 % против 23,9 %; $p<0,001$). Интенсивность боли по ВАШ также была выше при необратимом пульпите (медиана 7 [6;8] баллов против 4 [3;5] баллов при обратимом; $p<0,001$). Вместе с тем полного диагно-

стического разделения по симптоматике не наблюдалось: часть пациентов с обратимым пульпитом предъявляли жалобы на выраженную боль, а у части пациентов с необратимым пульпитом преобладала провоцируемая боль без типичной «классической» ночной симптоматики. Это принципиально подтверждает клиническую проблему, ради которой и строилось настоящее исследование: жалобы и анамнез повышают вероятность правильного диагноза, но сами по себе не обеспечивают достаточной устойчивости решения в каждом конкретном случае. При осмотре различия по болезненности при зондировании глубокого кариозного поражения были менее выраженными, чем по болевому поведению в анамнезе, что подчеркивает ограниченную дифференцирующую ценность изолированного локального осмотра без функциональных тестов. Положительная вертикальная/горизонтальная перкуссия встречалась чаще у пациентов с необратимым пульпитом (36,4 % против 8,7 %; p=0,002), а болезненность при пальпации переходной складки — реже, но также преимущественно в этой группе (13,6 % против 2,2 %; p=0,048). Наличие этих признаков не противоречит критериям исключения, поскольку речь шла не о выраженных гнойных осложнениях или обширных периапикальных изменениях, а о ранних реактивных проявлениях, которые в реальной клинической практике нередко сопровождают воспаление пульпы и влияют на первичное диагностическое впечатление врача.

При анализе рентгенологических данных в группе необратимого пульпита чаще определялись глубокие поражения с близким расположением к полости зуба и умеренное расширение периодонтальной щели без выраженных периапикальных очагов (27,3 % против 8,7 %; p=0,018), однако этот признак также не был универсальным. Холодовая проба продемонстрировала наибольшую клиническую информативность среди рутинных функциональных тестов: у пациентов с необратимым пульпитом медиана длительности боли после прекращения холодового раздражителя составила 38 [24;64] с, тогда как при обратимом пульпите — 6 [3;10] с (p<0,001). При использовании клинически значимого порога длительности постстимульной боли >30 с данный критерий ассоциировался с необратимым пульпитом, однако перекрытие оставалось выраженным: у части пациентов с необратимым пульпитом реакция была менее продолжительной, а отдельные пациенты с обратимым пульпитом демонстрировали пролонгированный ответ, вероятно, на фоне высокой индивидуальной болевой чувствительности и особенностей поражения. Электроодонтометрия также выявила статистически значимые различия: порог реакции был выше при необратимом пульпите (30 [22;41] усл. ед.) по сравнению с обратимым (15 [10;21] усл. ед.; p<0,001). Однако и этот тест не обеспечивал полного разделения групп, что соответствует известной клинической особенности sensibility-методов: они отражают нейросенсорный ответ пульпы, а не напрямую степень сосудисто-воспалительных изменений. Именно наличие такой зоны перекрытия по симптоматике, холодовой пробе и ЭОД, несмотря на статистическую значимость межгрупповых различий, делает целесообразным включение в диагностический алгоритм более объективного показателя, связанного с микроциркуляцией пульпы. Таким образом, результаты данного блока подтверждают, что базовый набор клинических тестов остается необходимым и информативным, но не исчерпывающим инструментом дифференциальной диагностики обратимого и необратимого пульпита.

В группе обратимого пульпита медиана сатурации кислорода (SpO_2) исследуемого зуба составила 91 % [88;94], тогда как в группе необратимого пульпита — 83 % [79;87] (p<0,001). Полученное снижение пульпарной сатурации при необратимом пульпите согласуется с патофизиологической логикой более выраженных сосудисто-воспалительных изменений и ухудшения локальной микроциркуляции. При этом значения на контрольных зубах (интактный симметричный или аналогичный по группе) статистически значимо не различались между группами (95 % [94;97] и 96 % [94;97]; p=0,37), что косвенно подтверждает локальный характер выявленных различий на исследуемом зубе, а не системное влияние общесоматических факторов. Показатели на пальце во всех группах оставались стабильными (медиана 98 % [97;99]), что использовалось как контроль качества сигнала и корректности работы прибора в момент исследования. На подвыборке из 30 пациентов, предусмотренной протоколом, внутриоператорская повторяемость пульсоксиметрии была высокой (ICC=0,91; 95 % ДИ 0,84–0,95), что позволяет рассматривать метод как воспроизводимый при соблюдении стандартизированной техники фиксации датчика и условий измерения. Одновременно важно подчеркнуть, что даже при хорошем уровне воспроизводимости метод не свободен от технических ограничений: в нашем исследовании технически неинтерпретируемые результаты были получены в 5,1 % случаев завершивших наблюдение, преимущественно в жевательной группе зубов. Это наблюдение имеет прикладной смысл: пульсоксиметрия в клинической практике должна использоваться не как «автономный арбитр», а как элемент комбинированного алгоритма, особенно в ситуациях, когда сигнал удается стабильно зарегистрировать и сопоставить с результатами классических тестов.

При анализе вторичных конечных точек холодовая проба с использованием критерия длительности постстимульной боли >30 с показала чувствительность 77,3 % и специфичность 78,3 % в отношении диагностики необратимого пульпита; прогностическая ценность положительного результата составила 83,6 %, отрицательного — 70,6 %. Для ЭОД (порог >24 усл. ед.,

определенный по анализу диагностической эффективности) чувствительность составила 72,7 %, специфичность — 76,1 %; диагностические характеристики были статистически приемлемыми, но уступали холодовой пробе по совокупности показателей. Пульсоксиметрия как отдельный тест при пороговом значении SpO_2 ≤86 % (определенном по индексу Юдена) продемонстрировала чувствительность 81,8 % и специфичность 82,6 %; PPV составила 87,1 %, NPV — 76,0 %, LR+ — 4,70, LR– — 0,22. Таким образом, по совокупности метрик пульсоксиметрия в условиях данного одноцентрового исследования оказалась не ниже, а по ряду параметров (прежде всего по специфичности и отношениям правдоподобия) выше отдельных рутинных sensibility-тестов. Первичное клиническое заключение врача-исследователя 1, сформированное без учета пульсоксиметрии, показало чувствительность 83,3 % и специфичность 76,1 % при общей доле правильной классификации 80,4 %. Это важный результат с практической точки зрения: опытный клинический осмотр с анамнезом и стандартными тестами обеспечивает приемлемое качество диагностики, однако сохраняет заметную долю ошибок, в том числе потенциально значимых для выбора тактики лечения. Следовательно, задача исследования состояла не в «замене» клинического мышления прибором, а в проверке, способен ли объективный показатель SpO_2 улучшить точность уже сформированного клинического решения.

При построении базовой логистической модели, включавшей клинические предикторы (наличие спонтанной/ночной боли, длительность постстимульной боли при холодовой пробе, порог ЭОД, болезненность при перкуссии и рентгенологические признаки реактивных изменений), площадь под ROC-кривой составила 0,891 (95 % ДИ 0,832–0,949). После добавления в модель показателя пульсоксиметрии (SpO_2 исследуемого зуба как количественного предиктора) AUC увеличилась до 0,944 (95 % ДИ 0,901–0,986); различие между моделями было статистически значимым по DeLong (p=0,021). В расширенной модели снижение SpO_2 сохраняло независимую ассоциацию с вероятностью необратимого пульпита после поправки на клинические признаки: отношение шансов необратимого пульпита при снижении SpO_2 на 1 % составило 1,23 (95 % ДИ 1,11–1,37; p<0,001). Практически это означает, что пульсоксиметрия вносит самостоятельную диагностическую информацию, не дублируя полностью данные анамнеза, холодовой пробы или ЭОД. На уровне классификационных характеристик комбинированная модель обеспечила чувствительность 87,9 % и специфичность 89,1 % при общей доле правильной классификации 88,4 %, что превышало показатели как первичного клинического заключения, так и базовой модели без SpO_2. Наиболее выраженный прирост наблюдался по специфичности, то есть комбинированный подход лучше снижал риск гипердиагностики необратимого пульпита у пациентов с обратимыми воспалительными изменениями. С клинической точки зрения именно этот аспект представляется особенно значимым, поскольку связан с потенциальным уменьшением числа необоснованных эндодонтических вмешательств и более обоснованным выбором витальной тактики в сомнительных случаях.

Полученные данные позволяют предложить прагматичную модель использования пульсоксиметрии не как самостоятельного «решающего» теста, а как этапа уточнения диагноза после первичного клинического заключения. В случаях, когда клиническая картина типична (например, выраженная спонтанная и ночная боль, длительный постстимульный ответ на холод, высокий порог ЭОД и положительная перкуссия), роль пульсоксиметрии может быть подтверждающей. Наибольшую ценность метод, по нашим наблюдениям, имеет при промежуточной или противоречивой картине, когда жалобы, термопроба и ЭОД не дают уверенного разграничения между обратимым и необратимым пульпитом. В этих ситуациях снижение SpO_2 ниже установленного порога увеличивает вероятность необратимого воспаления и повышает уверенность клинического решения, тогда как показатели, близкие к контрольному зубу, требуют более осторожной интерпретации в пользу органосохраняющей тактики (при отсутствии иных убедительных критериев необратимости). Такой подход соответствует современной тенденции к повышению точности первичной диагностики и минимизации как гипер-, так и гиподиагностики воспалительных поражений пульпы. Одновременно следует подчеркнуть, что пороговое значение SpO_2, определенное в настоящем исследовании, является валидным прежде всего для использованного протокола измерения и конкретной технической конфигурации датчика; механическое перенесение этого порога в иные клинические условия без локальной валидации может снижать воспроизводимость результатов.

Заключение

Стандартный клинический диагностический комплекс (жалобы, анамнез, термопроба, электроодонтометрия, перкуссия/пальпация, рентгенологические признаки) обеспечивает клинически приемлемую, однако недостаточно высокую точность дифференциальной диагностики обратимого и необратимого пульпита вследствие частичного перекрытия симптомов и результатов sensibility-тестов. Пульсоксиметрия зуба продемонстрировала высокую техническую применимость в амбулаторной практике, хорошую воспроизводимость и статистически значимые различия показателя SpO_2 между группами, что подтверждает ее клиническую информативность как более объективного маркера состояния пульпы. Включение пульсоксиметрии в модель, основанную на клинических тестах, сопровождалось достоверным повышением диагностической точности (в том

числе AUC и общей доли правильной классификации), при этом снижение SpO_2 сохраняло независимую ассоциацию с вероятностью необратимого пульпита. Полученные данные обосновывают целесообразность применения пульсоксиметрии не как замены клинического обследования, а как метода уточнения диагноза в составе комбинированного алгоритма, особенно в клинически пограничных случаях; вместе с тем для внешней валидации пороговых значений и расширения применимости подхода необходимы дальнейшие мультицентровые исследования со стандартизацией протокола измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ricucci D., Siqueira J.F. Jr., Li Y., Tay F.R. Vital pulp therapy: histopathology and histobacteriology-based guidelines to treat teeth with deep caries and pulp exposure // J. Dent. 2019. Vol. 86. P. 41–52. doi:10.1016/j.jdent.2019.05.022.
2. Karrar R.N., Craig S.G., Duncan H.F., Abushouk S.A., Elfiel S.Y., Lundy F.T., Clarke M., El-Karim I.A.; Reliability Assessment Group. Clinical validation of a proposed diagnostic classification for pulpitis // Int. Endod. J. 2025. Vol. 58, № 8. P. 1158–1171. doi:10.1111/iej.14254.
3. Edwards D., Allison J.R., Coulter J., Durham J., Beecroft E.V. Symptomatic irreversible pulpitis and other orofacial pain: overcoming challenges in diagnosis and management // Br. Dent. J. 2025. Vol. 238, № 7. P. 517–526. doi:10.1038/s41415-025-8441-9.
4. Alghaithy R.A., Qualtrough A.J.E. Pulp sensibility and vitality tests for diagnosing pulpal health in permanent teeth: a critical review // Int. Endod. J. 2017. Vol. 50, № 2. P. 135–142. doi:10.1111/iej.12611.
5. Azim A.A., Merdad K., Peters O.A. Diagnosis consensus among endodontic specialists and general practitioners: An international survey and a proposed modification to the current diagnostic terminology // Int. Endod. J. 2022. Vol. 55, № 11. P. 1202–1211. doi:10.1111/iej.13816.
6. Duncan H.F. Present status and future directions-Vital pulp treatment and pulp preservation strategies // Int. Endod. J. 2022. Vol. 55, № Suppl. 3. P. 497–511. doi:10.1111/iej.13688.
7. Duncan H.F., Kirkevang L.-L., Peters O.A., El-Karim I., Krastl G., Del Fabbro M., Chong B.S., Galler K.M., Segura-Egea J.J., Kebschull M.; ESE Workshop Participants and Methodological Consultant. Treatment of pulpal and apical disease: The European Society of Endodontology (ESE) S3-level clinical practice guideline // Int. Endod. J. 2023. Vol. 56, № Suppl. 3. P. 238–295. doi:10.1111/iej.13974.
8. Kasper R.H., Coelho M.R., Miguens-Jr S.A.Q., Grazziotin-Soares R., Barletta F.B. Pulse oximetry as a dental pulp test: A scoping review to identify barriers hindering the use of oximeters in clinical practice // Saudi Dent. J. 2024. Vol. 36, № 2. P. 262–269. doi:10.1016/j.sdentj.2023.11.006.
9. Almudever-Garcia A., Forner L., Sanz J.L., Llena C., Rodríguez-Lozano F.J., Guerrero-Gironés J., Melo M. Pulse Oximetry as a Diagnostic Tool to Determine Pulp Vitality: A Systematic Review // Appl. Sci. 2021. Vol. 11, № 6. Art. 2747. doi:10.3390/app11062747.
10. Anusha B., Madhusudhana K., Chinni S.K., Paramesh Y. Assessment of Pulp Oxygen Saturation Levels by Pulse Oximetry for Pulpal Diseases -A Diagnostic Study // J. Clin. Diagn. Res. 2017. Vol. 11, № 9. P. ZC36–ZC39. doi:10.7860/JCDR/2017/28322.10572.

© Джанбулатов Мурат Абдулвагитович; Будайчиев Гасан Магомед-Алиевич (gasan.budaychiev005@mail.ru);
Чавтараев Мурад Магомедович; Магомедова Умият Абдулбасировна; Курбанова Эльмира Абуталибовна
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.12

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕЖМЫЩЕЛКОВОГО РАССТОЯНИЯ ПО ДАННЫМ КОНУСНО-ЛУЧЕВОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ И ЕГО СОПОСТАВЛЕНИЕ СО СТАНДАРТИЗИРОВАННЫМ ПАРАМЕТРОМ АРТИКУЛЯТОРОВ

MORPHOMETRIC ANALYSIS OF INTERCONDYLAR DISTANCE BASED ON CONE-BEAM COMPUTED TOMOGRAPHY AND ITS COMPARISON WITH THE STANDARDIZED ARTICULATOR PARAMETER

S. Eliseev

Summary. The correspondence between standardized articulator parameters and individual anatomical characteristics remains a relevant issue in contemporary prosthodontics. This retrospective cross-sectional morphometric study was designed to assess the anatomical variability of the intercondylar distance in an adult population using cone-beam computed tomography and to compare it with the standardized value of 110 mm. The analysis was performed on archived CBCT datasets employing dedicated three-dimensional imaging software and appropriate statistical methods for quantitative variables. Particular emphasis was placed on the distribution pattern, variability assessment, and potential sex-related differences. The study contributes to the rationale for an individualized approach to transferring spatial parameters in both digital and conventional articulatory systems.

Keywords: intercondylar distance, dental articulator, Bonwill triangle, digital dentistry.

Елисеев Сергей Васильевич
Аспирант, Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко
eliseew92@mail.ru

Аннотация. Проблема соответствия стандартизированных параметров артикуляторов индивидуальной анатомии пациентов сохраняет актуальность в современной ортопедической стоматологии. Настоящее ретроспективное одномоментное морфометрическое исследование направлено на оценку анатомической вариабельности межмыщелкового расстояния по данным конусно-лучевой компьютерной томографии у взрослой популяции и его сопоставление со стандартизированным значением 110 мм. Анализ выполнен на основе архивных КТ-данных с применением специализированного программного обеспечения трёхмерной визуализации и методов статистической обработки количественных показателей. Особое внимание уделено распределению значений, оценке вариабельности и анализу возможных половых различий. Полученные данные имеют значение для обоснования индивидуализированного подхода при переносе пространственных параметров в артикуляционные системы.

Ключевые слова: межмыщелковое расстояние, артикулятор, треугольник Бонвиля, цифровая стоматология.

Введение

В современной ортопедической стоматологии ключевым направлением развития является повышение точности воспроизведения функциональной анатомии зубочелюстной системы. Это обусловлено тем, что даже незначительные отклонения в пространственном положении челюстей могут приводить к формированию неадекватных окклюзионных контактов, перегрузке отдельных зубов, а также дисфункции височно-нижнечелюстного сустава (ВНЧС) [1,2].

Особое значение в этом контексте приобретает корректная передача параметров артикуляции. Артикуляторы, являясь механическими или цифровыми моделями жевательного аппарата, широко применяются для моделирования движений нижней челюсти и анализа окклюзионных взаимоотношений [3]. Их конструкция основана на ряде усреднённых анатомических параметров, включая наклон суставного пути, угол Беннетта и межмыщелковое расстояние [4].

Межмыщелковое расстояние представляет собой ключевой геометрический параметр, определяющий положение осей вращения нижней челюсти. В большинстве стандартных артикуляторов данный показатель фиксирован и составляет 110 мм. Это значение исторически связано с концепцией треугольника Бонвиля, опи-

сывающего равносторонний треугольник между мыщелками нижней челюсти и резцовой точкой [5].

Однако развитие методов трёхмерной диагностики, включая конусно-лучевую компьютерную томографию (КЛКТ), позволяет более точно оценивать индивидуальные анатомические параметры пациента. В связи с этим возникает вопрос о соответствии усреднённых артикуляционных настроек реальным морфометрическим характеристикам [6,7].

Таким образом, исследование межмыщелкового расстояния с использованием современных методов визуализации представляет собой актуальную задачу, направленную на повышение точности ортопедического лечения.

Литературный обзор

Проблема взаимосвязи окклюзии и состояния ВНЧС остаётся одной из наиболее дискуссионных в стоматологии. Несмотря на отсутствие однозначных доказательств прямой причинно-следственной связи, большинство авторов сходятся во мнении, что нарушение окклюзионных взаимоотношений может выступать фактором риска развития функциональных нарушений [1,2].

В этой связи особое внимание уделяется точности воспроизведения движений нижней челюсти при помощи артикуляторов. Современные системы, включая виртуальные артикуляторы, позволяют моделировать движения с высокой степенью детализации, однако их точность во многом зависит от корректности исходных параметров [3].

Межмыщелковое расстояние является одним из базовых параметров артикуляции, определяющим положение шарнирной оси и влияющим на траекторию движения нижней челюсти. В классической концепции Бонвиля предполагается существование равностороннего треугольника со стороной около 4 дюймов (примерно 101,6 мм), что впоследствии было трансформировано в стандартизированное значение 110 мм в ряде артикуляторов [5].

Однако современные исследования демонстрируют, что краниофациальные параметры характеризуются значительной индивидуальной вариабельностью. По данным антропометрических и радиологических исследований, межмыщелковое расстояние может существенно варьировать в зависимости от пола, возраста и морфотипа лица [4,9].

Развитие цифровых технологий, включая CAD/CAM-системы и методы трёхмерного моделирования, позволяет переходить от усреднённых параметров к индивидуализированным значениям [6,7]. В частности, использование КЛКТ обеспечивает высокоточную визуализацию анатомических структур и позволяет проводить измерения с высокой степенью воспроизводимости [10,11].

Современные данные также указывают на то, что вариабельность морфологических параметров может иметь клиническое значение при планировании ортопедического лечения, особенно в условиях полной реабилитации окклюзии [12]. Кроме того, выявлены выраженные половые различия в размерах лицевого скелета, что дополнительно подтверждает необходимость индивидуального подхода [13].

Таким образом, анализ межмыщелкового расстояния с использованием трёхмерных методов диагностики представляет собой важное направление исследований, направленных на повышение точности артикуляции и качества ортопедического лечения.

Материалы и методы исследования

Настоящее исследование выполнено в формате ретроспективного одномоментного морфометрического анализа.

В исследование включены 1000 КЛКТ-исследований пациентов, соответствующих следующим критериям включения:

1. возраст 18 лет и старше;
2. наличие визуализации обоих височно-нижнечелюстных суставов;
3. достаточное качество изображения для проведения измерений.

Критерии исключения включали:

1. выраженные дегенеративные изменения ВНЧС;
2. посттравматические деформации;
3. перенесённые хирургические вмешательства;
4. наличие артефактов, препятствующих точной визуализации.

Измерение межмыщелкового расстояния проводилось на трёхмерных моделях с использованием специализированного программного обеспечения. В качестве ориентиров использовались геометрические центры мыщелковых отростков, определяемые по аксиальным и коронарным срезам.

Все измерения выполнялись по стандартизированному протоколу, обеспечивающему воспроизводимость результатов.

Статистическая обработка данных проводилась в программном пакете IBM SPSS Statistics (версия 27). Рассчитывались:

1. среднее значение (M);
2. стандартное отклонение (SD);
3. медиана (Me);
4. интерквартильный размах (IQR);
5. минимальные и максимальные значения;
6. 95 % доверительный интервал.

Для сравнения со стандартизированным значением 110 мм использовался одновыборочный t-критерий. Для анализа различий между группами применялся t-критерий для независимых выборок.

Результаты исследования

Проведённый морфометрический анализ 1000 КЛКТ-исследований позволил получить детальную количественную характеристику межмыщелкового расстояния в исследуемой популяции.

Установлено, что среднее значение показателя составило 99,77 ± 6,28 мм, что свидетельствует о выраженной вариабельности признака. При этом 95 % доверительный интервал для среднего находился в пределах 99,38–100,16 мм, что указывает на высокую точность оценки среднего значения и репрезентативность выборки.

Минимальное зарегистрированное значение составило 86,10 мм, максимальное — 120,50 мм, что формирует общий диапазон вариации 34,4 мм. Такой широкий диапазон отражает значительную индивидуальную изменчивость анатомического строения височно-нижнечелюстного сустава.

Дополнительный анализ распределения показал, что значения межмыщелкового расстояния не являются строго нормальными. Наблюдается смещение распределения в сторону меньших значений относительно стандартизированного параметра 110 мм, что проявляется в асимметрии распределения.

Медианное значение (Me) располагалось ниже среднего, что дополнительно подтверждает наличие правосторонней асимметрии распределения. Интерквартильный размах (IQR) свидетельствовал о концентрации основной массы значений в относительно узком диапазоне вокруг среднего, несмотря на наличие крайних значений.

Результаты одновыборочного t-критерия показали статистически значимое отличие среднего значения от стандартизированного параметра 110 мм ($t = -51{,}531$; $p < 0{,}001$). Средняя разность составила — 10,23 мм, что указывает на систематическое, а не случайное отклонение.

Анализ частотного распределения позволил более наглядно оценить структуру вариации показателя:

1. 94,0 % наблюдений — значения менее 110 мм;
2. 6,0 % — значения более 110 мм;
3. значения, равные 110 мм, практически отсутствовали.

Таким образом, стандартизированное значение 110 мм располагается вне зоны концентрации основной массы наблюдений.

При стратификации выборки по полу выявлены статистически значимые различия. У мужчин среднее значение составило 104,01 ± 5,38 мм, у женщин — 97,74 ± 5,64 мм. Различия подтверждены t-критерием для независимых выборок ($t = 16{,}697$; $p < 0{,}001$).

Несмотря на выявленный половой диморфизм, в обеих группах средние значения остаются ниже 110 мм, что подтверждает общую тенденцию смещения показателя.

Дополнительно следует отметить, что стандартное отклонение в обеих группах сопоставимо, что указывает на сходный уровень вариабельности независимо от пола.

Обсуждение результатов

Полученные результаты подтверждают, что межмыщелковое расстояние не является фиксированной анатомической величиной и характеризуется значительной индивидуальной вариабельностью. Выявленный диапазон значений указывает на необходимость учёта данного параметра при планировании ортопедического лечения.

Ключевым является установленное систематическое смещение показателя относительно стандартизированного значения 110 мм. Разница более 10 мм свидетельствует о том, что используемый в артикуляторах параметр не отражает анатомическую норму для большинства пациентов.

С биомеханической точки зрения это означает, что при использовании фиксированного межмыщелкового расстояния происходит смещение шарнирной оси артикулятора относительно реальной анатомической оси, что может приводить к искажению траекторий движений нижней челюсти и формированию неточностей при моделировании окклюзии.

Рассматривая данные в контексте концепции треугольника Бонвиля, следует отметить, что классическая модель носит усреднённый характер и не учитывает индивидуальную морфологическую вариабельность. Это ограничивает её применимость, особенно в условиях цифрового протезирования, где требования к точности значительно возрастают.

Выявленные половые различия соответствуют общим антропометрическим закономерностям, однако не изменяют общей тенденции смещения показателя в сторону меньших значений. В совокупности полученные данные указывают на необходимость перехода от стандартизированных артикуляционных параметров к индивидуализированным, основанным на трёхмерной диагностике.

Заключение и выводы

Проведённое исследование, основанное на морфометрическом анализе 1000 КЛКТ-исследований с трёхмерным определением анатомических центров мыщелковых отростков, позволило получить объективную характеристику межмыщелкового расстояния в клинической популяции. Установлено, что данный параметр обладает выраженной индивидуальной вариабельностью и его среднее значение статистически значимо ниже стандартизированного показателя 110 мм, используемого в большинстве артикуляторов. Показано, что в подавляющем большинстве наблюдений индивидуальные значения межмыщелкового расстояния не соответствуют артикуляторному стандарту, что свидетельствует о систематическом характере расхождения. Выявленные половые различия подтверждают наличие диморфизма, однако не изменяют общей тенденции смещения показателя в сторону меньших значений.

Полученные результаты демонстрируют, что применение фиксированного межмыщелкового расстояния формирует условную артикуляционную модель, в которой положение шарнирной оси не соответствует индивидуальной анатомии пациента, что может приводить к искажению моделируемых движений нижней челюсти. Установлено, что классическая концепция треугольника Бонвиля, лежащая в основе большинства артикуляционных систем, отражает усреднённую геометрическую модель и не учитывает выявленную вариабельность параметра, что ограничивает её клиническую применимость в условиях современной цифровой стоматологии. В совокупности полученные данные обосновывают необходимость пересмотра принципов настройки и конструкции артикуляторов с переходом к индивидуализированному определению межмыщелкового расстояния на основании методов трёхмерной визуализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Manfredini D., Lombardo L., Siciliani G. Temporomandibular disorders and dental occlusion: a systematic review. J Oral Rehabil. 2020;47(6):739–749. DOI: 10.1111/joor.12961
2. Türp J.C., Greene C.S., Manfredini D. Dental occlusion and temporomandibular disorders: where we are and where we are going. J Oral Rehabil. 2022;49(4):401–412. DOI: 10.1111/joor.13288
3. Solaberrieta E., Otegi J.R., Brizuela A. Digital articulators in prosthodontics: current concepts and clinical applications. J Prosthet Dent. 2021;126(3):398–406. DOI: 10.1016/j.prosdent.2020.07.019
4. Kwon H.B., Han J.S., Kim S.H. Anthropometric considerations in articulator settings: a CBCT-based study. Clin Oral Investig. 2021;25(9):5401–5409. DOI: 10.1007/s00784-021-03892-4
5. Gross M.D., Nemcovsky C.E. Revisiting Bonwill's triangle in modern prosthodontics. J Prosthodont. 2020;29(8):681–687. DOI: 10.1111/jopr.13162
6. Revilla-León M., Özcan M. Additive manufacturing technologies used for processing polymers in prosthodontics. J Prosthodont. 2020;29(2):146–158. DOI: 10.1111/jopr.13120
7. Mangano F., Margiani B., Admakin O. A novel full-digital protocol for prosthetic rehabilitation: a prospective study. Materials (Basel). 2022;15(5):1923. DOI: 10.3390/ma15051923
8. Iwasaki L.R., Nickel J.C. Biomechanics of mandibular movement and occlusal loading. J Oral Rehabil. 2021;48(9):1042-1051. DOI: 10.1111/joor.13198
9. Alhammadi M.S., Halboub E., Fayed M.S. Global distribution of craniofacial morphological variation: a CBCT-based review. BMC Oral Health. 2021;21:583. DOI: 10.1186/s12903-021-01905-0
10. Scarfe W.C., Angelopoulos C. Maxillofacial cone beam computed tomography: principles and clinical applications. Dent Clin North Am. 2020;64(2):343–368. DOI: 10.1016/j.cden.2019.11.005
11. Park J.H., Tai K., Kook Y.A. Three-dimensional condylar morphology analysis using CBCT. Imaging Sci Dent. 2022;52(2):155–163. DOI: 10.5624/isd.20220028
12. Hassan B., Nijkamp P., Verheij H. Craniofacial morphological variability assessed by CBCT imaging. Clin Oral Investig. 2023;27(4):2145–2154. DOI: 10.1007/s00784-022-04789-6
13. Bigoni L., Velemínská J., Brůžek J. Sexual dimorphism in craniofacial dimensions: a 3D imaging study. Forensic Sci Int. 2020;313:110345. DOI: 10.1016/j.forsciint.2020.110345
14. Ai H., Choi J.H., Kim S.H. Digital workflows and AI integration for prosthodontic rehabilitation. J Prosthodont Res. 2025;69(2):145–157. DOI: 10.2186/jpr.25-0053

© Елисеев Сергей Васильевич (eliseew92@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.18

МИКРОЭЛЕКТРОДНЫЙ РЕКОРДИНГ ПРИ СТЕРЕОТАКСИЧЕСКОЙ DBS-ХИРУРГИИ

MICROELECTRODE RECORDING IN STEREOTACTIC DBS SURGERY

T. Koksharova
A. Kholyavin
D. Samsonov
V. Kal'mens

Summary. This article analyzes publications on the use of MER in functional neurosurgery, including randomized trials, retrospective series, and meta-analyses. Single- and multi-tract strategies are discussed, along with the neurophysiological foundations of the method, its technical aspects, and application in various nosologies. A comparison of MER with neuroimaging methods (MRI/CT) is made. It is concluded that MER allows for refinement of target boundaries by recording neuronal activity; however, its informativeness is limited when working with tract-oriented structures. Modern neuroimaging methods demonstrate a high degree of concordance with MER data, that allows in some cases to abandon its use. MER remains an important tool for intraoperative navigation, but is not a prerequisite for successful DBS. The choice of strategy should be based on the clinical task, target type, and the technical capabilities of the center. Thus, MER is moving from being a mandatory intraoperative procedure to an additional method of functional verification.

Keywords: deep brain stimulation, microelectrode recording, DBS, Parkinson's disease, dystonia, essential tremor, epilepsy, neuroimaging.

Кокшарова Татьяна Сергеевна
Клинический ординатор, Российский научно-исследовательский нейрохирургический институт им. профессора А.Л. Поленова (филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации), Санкт-Петербург
koksharova-tanya@mail.ru
Холявин Андрей Иванович
доктор медицинских наук, врач-нейрохирург, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мозга человека им. Н.П. Бехтеревой Российской академии наук, Санкт-Петербург
Kholyavin@mail.ru
Самсонов Даниил Валерьевич
Врач-невролог, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мозга человека им. Н.П. Бехтеревой Российской академии наук, Санкт-Петербург
office@ihb.spb.ru
Кальменс Вячеслав Яковлевич
кандидат медицинских наук, врач-нейрохирург, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мозга человека им. Н.П. Бехтеревой Российской академии наук, Санкт-Петербург
Vjkalmens@yandex.ru

Аннотация. Проведен анализ публикаций, посвященных применению MER в функциональной нейрохирургии, включая рандомизированные исследования, ретроспективные серии и мета-анализы. Рассмотрены одно- и многоканальная (single- и multi-tract) стратегии, описаны нейрофизиологические основы метода, его технические аспекты и особенности применения при разных нозологиях. Сделано сопоставление MER с методами нейровизуализации (МРТ/КТ). Сформулированы выводы о том, что MER позволяет уточнять границы мишеней за счет регистрации нейронной активности, однако его информативность ограничена при работе с тракт-ориентированными структурами. Современные методы нейровизуализации демонстрируют высокую степень соответствия с данными MER, что позволяет в ряде случаев отказаться от его использования. MER остается важным инструментом интраоперационной навигации, однако не является обязательным условием успешного выполнения DBS. Выбор стратегии должен основываться на клинической задаче, типе мишени и технических возможностях центра. Таким образом, MER переходит из разряда обязательной интраоперационной процедуры к роли дополнительного метода функциональной верификации.

Ключевые слова: глубокая стимуляция мозга, микроэлектродный рекординг, DBS, болезнь Паркинсона, дистония, эссенциальный тремор, эпилепсия, нейровизуализация.

Глубокая стимуляция мозга (deep brain stimulation, DBS) является одним из методов лечения ряда неврологических расстройств, включая болезнь Паркинсона (БП), дистонию, эссенциальный тремор и фармакорезистентную эпилепсию. Ключевой фактор эффективности терапии — точность стереотаксического наведения и позиционирования электрода в пределах функционально значимых структур мозга. Для этого в рамках интраоперационной верификации применяется микроэлектродный рекординг (MER). Метод основывается на регистрации нейронной активности, что позволяет уточнить границы анатомических структур и скорректировать координаты имплантации.

MER все еще рассматривается как «золотой стандарт» в DBS-хирургии, однако применение метода сопряжено с увеличением длительности операции и количеством инвазивных манипуляций. По этой причине возрастает вероятность осложнений. Также информативность MER ограничена при выборе тракт-ориентированных структур белого вещества ограничена из-за меньшей плотности тел нейронов.

Цель обзора: системный анализ современной доказательной базы, раскрывающей роль MER при DBS; последовательная оценка клинической значимости, ограничений и альтернативных подходов на основе нейровизуализации; выявление методологических условий и границ применимости.

Микроэлектродный рекординг (MER) при глубокой стимуляции мозга представляет собой интраоперационный метод регистрации высокочастотной внеклеточной активности нейронов (single- и multi-unit activity) вдоль стереотаксической траектории. В ходе анализа изменений разрядной активности идентифицируются границы и особенности мишеней на основе оценки нейрофизиологических паттернов. Однако информативность MER снижается при работе с тракт-ориентированными мишенями белого вещества из-за низкой плотности тел нейронов и меньшей специфичности регистрируемых сигналов. Кроме того, метод связан с увеличением длительности операции. С другой стороны, использование МРТ/КТ в качестве валидизации траектории снижает инвазивность в ходе операции, но предъявляет повышенные требования к точности нейровизуализации. Даже при прямом стереотаксическом наведении по МРТ реальная анатомия и функциональная топография мишени могут отличаться от ожидаемой из-за индивидуальной вариабельности, ограничений визуализации и интраоперационных факторов. С этой точки зрения многоканальная стратегия MER теоретически позволяет сопоставить несколько траекторий и выбрать канал с наиболее убедительными признаками прохождения целевой структуры и благоприятным функциональным расположением.

Стратегии: single-tract и multi-tract MER

Доказательная база по стратегиям single-tract и multi-tract MER включает как рандомизированные исследования, так и крупные ретроспективные серии. Bjerknes S., Toft M., Konglund A.E. и соавт. провели сравнение в двойном слепом рандомизированном исследовании, где 60 пациентов распределили на равные группы для определения эффективности и безопасности DBS субталамического ядра (subthalamic nucleus, STN) при разных стратегиях MER [1]. По результатам исследования спустя 12 месяцев после DBS в группе с использованием нескольких микроэлектродов наблюдалось более существенное улучшение как по показателю MDS-UPDRS III, так и по PDQ-39. В то же время в крупной серии Umemura и соавт. проанализировали результаты STN-DBS у 221 пациента и сделали вывод, что необходимый эффект достигается с минимальным количеством траекторий за счет правильного наведения и интерпретации данных MER [2]. Вопрос о потенциальных рисках многоканального MER обсуждается в сравнительном исследовании Runge и соавт., где на серии 645 функциональных стереотаксических процедур показано, что в их опыте интраоперационный MER не увеличивал общий риск кровоизлияния. При этом авторы подчеркивают, что они в основном использовали single-tract подход [3]. Инфекционные осложнения не зависят напрямую от MER, это больше связано с продолжительностью операции и количеством манипуляций. Одно исследование «asleep DBS» отметило чуть больший процент инфекций (до 16 %) [4], но это связано с тем, что при навигационной установке иногда требовалось несколько попыток.

MER в DBS при болезни Паркинсона (БП)

Основной мишенью в рамках DBS при болезни Паркинсона является субталамическое ядро. Специфичными для него являются нерегулярные паттерны нейронной активности со вспышками в диапазоне 30–70 Гц, сопровождающиеся увеличением базовой активности. Выход электрода на границу с черной субстанцией приводит к затиханию стимулов. Длина зоны активности по ходу траектории соответствует протяженности STN, что косвенно указывает на попадание электрода в ядро [5]. Кроме того, в дорсолатеральной (моторной) части STN удается зарегистрировать нейроны, меняющие частоту разряда при пассивных движениях конечностями, что помогает идентифицировать моторную область ядра. С точки зрения нейрофизиологических маркеров, STN демонстрирует патологические β-осцилляции [6]. Помимо β-ритма, MER может выявлять нейроны, активность которых синхронна с тремором [7].

По данным Soares M.I., Soares-Dos-Reis R., Rosas M.J. и соавт. совпадение между результатами MER и финальным положением электрода было лишь 57–58 %, тогда

как совпадение финальной позиции с лучшей точкой по тест-стимуляции составило 97–98 % [8]. Иными словами, хирурги чаще опирались на клинический эффект тестовой стимуляции, чем на сигналы MER при выборе окончательного положения электрода. Этот ретроспективный анализ 103 операций не выявил ухудшения исходов без MER, что ставит под вопрос его обязательность.

Несколько сравнительных серий и мета-анализов, проведенных Chuang T.C., Tan J.Q., Chen S.M., показывают, что разницы в улучшении моторных функций при DBS с MER и без него нет [9]. Оба подхода обеспечивают сопоставимый моторный эффект. Таким образом, данные указывают, что MER не является обязательным условием успешного DBS при БП. Тем не менее, важно учитывать дизайн исследований: в большинство анализов входили не рандомизированные серии с потенциальными систематическими отличиями. Также отмечено наличие публикационного смещения (центры, рутинно применяющие MER, чаще публиковали хорошие результаты, тогда как опыт с исключительно МРТ-навигацией описан реже).

Сопоставление данных нейровизуализации (при условии использования 3Т МРТ сканеров и специально подобранных программ сканирования) и микрорекординга показало высокую степень соответствия между верхней и нижней границами STN, визуализированных на дооперационных снимках и зарегистрированных при помощи интраоперационной MER [10]. Этот факт говорит в пользу обоснованности технологий стереотаксического наведения, основанных исключительно на предоперационной визуализации, без необходимости физиологической верификации.

MER при дистониях

При дистониях роль MER при DBS состоит в подтверждении входа в медиальный сегмент бледного шара (globus pallidus internus, GPi). Наружный бледный шар (globus pallidus externus, GPe) и GPi отличаются типом активности: в GPe регистрируют прерывающиеся разряды, тогда как для GPi характерен постоянный фон высокочастотной активности с периодическими всплесками [11]. Кроме того, внутри GPi можно пытаться локализовать сенсомоторную область. Нейроны GPi могут реагировать изменением разряда на пассивные движения соответствующих частей тела или на сенсорную стимуляцию [12]. Это позволяет удостовериться, что электрод находится не в переднем (лимбическом) отделе GPi, а ближе к задневентральному (сенсомоторному) отделу, что важно для лечебного эффекта. В ряде протоколов рекомендуется проверить отсутствие фотоиндуцированных нейронных ответов на MER, что помогает предотвратить нежелательное расположение электрода в находящемся рядом зрительном тракте.

Вариабельность размеров и положения GPi (например, при вторичных дистониях или у пациентов с аномалиями) на дооперационных МРТ затрудняет чисто анатомическое наведение. MER в таких случаях становится ценным дополнительным ориентиром, особенно когда пациенты под наркозом и нет возможности выполнить пробную стимуляцию. В литературе описан опыт ряда центров по установке GPi-электродов только под контролем МРТ, без MER: результаты оказались успешными. Так, исследование Sharma V.D., Bezchlibnyk Y.B., Isbaine F. 30 пациентов с дистонией, оперированных с применением интраоперационной МРТ и без MER, продемонстрировало улучшение по шкале BFMDRS на 63.4 % через год, что сопоставимо с историческими данными по «классическому» (MER) подходу. Авторы заключили, что asleep-DBS с МРТ-наведением при дистонии достигает таких же клинических исходов, как и операции в сознании и с MER [13]. В ретроспективном исследовании Zhang C, Wu B, Xian W и др. 20 пациентов с дистонией были прооперированы под общим наркозом с MER: применяли одноканальный MER, подавая пропофол в минимальной дозе. Все электроды были точно позиционированы в GPi; среднее улучшение по BFMDRS составило ~63 %; оценка когнитивных функций (MMSE) после операции продемонстрировала отсутствие ухудшения [11].

При дистонии ритмы менее специфичны. У пациентов преобладает низкочастотная осцилляторная активность в θ/α-диапазоне (4–12 Гц) [14], что интерпретируется как патологический ритм, ведущий к устойчивым мышечным спазмам.

Влияние MER на исходы при дистонии напрямую мало изучено. Тестовая стимуляция как интраоперационный метод обеспечивает преимущественно оценку побочных эффектов воздействия на GPi. Однако влияние стимуляции на выраженность симптоматики интраоперационно оценить затруднительно. Косвенно преимущество MER подтверждается тем, что большинство центров продолжают использовать его при лечении дистоний, в том числе во время операций под наркозом. Тем не менее, успешные результаты достигаются и без MER, при условии высокого качества нейровизуализации и стереотаксической техники. В итоге, роль MER при дистонии уточняет правильное попадание в GPi и позволяет избегать близлежащих структур (зрительный тракт, внутреннюю капсулу).

MER при эссенциальном треморе

Эссенциальный тремор (ЭТ) — одно из первых показаний, где DBS получила широкое применение. Мишенью при этом заболевании является вентрально-промежуточное ядро таламуса (Ventral Intermediate Nucleus, VIM). Особенностью данной структуры является отсутствие четких границ на стандартных МРТ-срезах. Поэто-

му MER исторически стал ключевым методом локализации VIM.

В самом VIM обычно удается зарегистрировать «клетки тремора», которые проявляют залповую активность, совпадающую по частоте с дрожанием у пациента [15]. Кроме того, некоторые нейроны VIM реагируют на пассивные движения или усилие. Кзади от VIM микроэлектрод входит в соматосенсорное вентральное заднелатеральное ядро (VPL). В VPL нейроны имеют отчетливые сенсорные поля: при прикосновении к определенной части тела они генерируют разряды. MER позволяет точно разграничить функциональные зоны таламуса. Оптимальная точка для постоянного электрода находится внутри VIM, чуть дальше границы с VPL [15]. Как правило, после MER проводят тестовую стимуляцию и проверяют на отсутствие сенсорных или моторных побочных эффектов.

С другой стороны, некоторые пациенты с ЭТ (особенно пожилые) с трудом переносят длительное бодрствование в раме из-за тревоги, утомления и пр. Asleep-DBS является решением этой проблемы. Систематический обзор Horan J., Donlon E., Walsh R.A. объединил данные 9 исследований с «asleep DBS» при ЭТ (всего 229 пациентов) и сравнил их с традиционными методами. Среднее функциональное улучшение (по шкале тремора/навыков) составило 57.62 %, что сопоставимо с историческими результатами при awake-операциях (50–70 %) [4]. Точность имплантации, оцениваемая по результатам интраоперационной нейровизуализации, оказалась высокой, при этом в 88–100 % случаев электрод попадал в целевую зону с первой попытки.

MER в DBS при эпилепсии

В 2018 году в США была одобрена стимуляция переднего ядра таламуса (anterior nucleus of thalamus, ANT) у пациентов с фармакорезистентной эпилепсией. Другие мишени находятся на стадии клинических испытаний. Наблюдения подтвердили нарастающий со временем эффект: медианное снижение частоты приступов достигает ~75 % через 7–10 лет постоянной стимуляции ANT [16].

ANT является частью лимбического круга и связано с распространением эпилептической активности [17]. Таргетирование ANT сложное, поскольку на обычной МРТ ядро визуализируется неотчетливо, его размеры и форма варьируют. MER как инструмент в ANT-DBS применялся лишь в отдельных центрах. Möttönen T., Katisko J., Haapasalo J. проанализировали 186 MER-сегментов у 5 больных, которым устанавливали электроды в ANT. Они соотнесли нейрофизиологические данные с 3Т МРТ изображениями. Выяснилось, что латеральная граница ANT практически не содержит спайковой активности, что соответствует белому веществу. Внутри самого ANT нейроны разряжались относительно редкими спайками, тогда как в вентральном переднем ядре (ventral anterior nucleus, VA) разряды были значительно чаще. MER позволяет дифференцировать белое вещество (lamina medullaris), собственно, ANT и соседние ядра по их характерной активности [18].

В то же время, в исследовании Salanova V., Sperling M.R., Gross R.E. и др. MER не использовали — электроды ставили по координатам с интраоперационным рентген-контролем [16]. Тем не менее, некоторые крупные группы практиковали MER при ANT, аргументируя это тем, что ANT сложно визуализировать, а MER может подтвердить нахождение в нужном ядре. В вышеупомянутой работе Möttönen и соавт. отмечают, что без MER была бы вероятность ошибки из-за индивидуальных отличий: у разных пациентов размеры ANT по 3Т МРТ изображениям колебались, а электрофизиология помогла скорректировать расчеты. Специальных сравнений «с MER и без него» не проводилось. Учитывая, что навигационный метод хорошо зарекомендовал себя, можно предположить, что отсутствие MER не критично, однако позволяет хирургу быть более уверенным в траектории.

При стимуляции других таламических структур, например, центромедианного ядра (centromedian nucleus, CM) при эпилепсии, MER также может оказаться весьма полезным. Исследование Ho J.C., Aung T., Damiani A. показало, что комплексный интраоперационный подход с использованием MER и одновременной регистрации ЭЭГ позволяет точнее выделить зоны в области CM таламуса для оптимального размещения электрода. Выяснилось, что стимуляция участков с более низкой базальной нейронной активностью вызывала более выраженную десинхронизацию эпилептических осцилляций по ЭЭГ, что коррелировало с контролем припадков [19].

Микроэлектродный рекординг остается важным методом, который технически может быть задействован в DBS при любых нозологиях. При этом нейрофизиологическая верификация внутримозговой стереотаксической мишени обеспечивается либо регистрацией ее границ по меняющемуся уровню сигнала, либо выявленными для ряда структур специфическими маркерами биоэлектрической активности. Наибольшая ценность MER сохраняется в условиях анатомической вариабельности, недостаточной визуализации структур и при работе с функционально неоднородными мишенями.

Вместе с тем современные данные свидетельствуют о том, что клинические исходы сопоставимы при использовании MER и при таргетировании, основанном исключительно на высокоточной нейровизуализации. Развитие МРТ-технологий позволяет в ряде случаев отказаться от обязательного применения MER без ухудшения результатов лечения.

Выбор стратегии таргетирования должен быть индивидуализирован и определяться клинической задачей, типом мишени, состоянием пациента и техническими возможностями центра. Оптимальным представляется гибкий подход, сочетающий преимущества нейровизуализации и нейрофизиологической верификации в зависимости от конкретной клинической ситуации. В дальнейшем целесообразно проведение исследований, где MER применяется для поиска новых биомаркеров структур-мишеней, в том числе при заболеваниях неврологического и психиатрического профилей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bjerknes S., Toft M., Konglund A.E. и др. Multiple microelectrode recordings in STN-DBS surgery for Parkinson's disease: a randomized study // Movement Disorders Clinical Practice. — 2018. — Vol. 5, № 3. — P. 296–305. — DOI: 10.1002/mdc3.12621.
2. Umemura A., Oka Y., Yamada K. и др. Validity of single tract microelectrode recording in subthalamic nucleus stimulation // Neurologia Medico-Chirurgica. — 2013. — Vol. 53, № 11. — P. 821–827. — DOI: 10.2176/nmc.oa2012-0412.
3. Runge J., Nagel J.M., Schrader C. и др. Microelectrode recording and hemorrhage in functional neurosurgery: a comparative analysis in a consecutive series of 645 procedures // Journal of Neurosurgery. — 2023. — Vol. 140, № 5. — P. 1442–1450. — DOI: 10.3171/2023.8.JNS23613.
4. Horan J., Donlon E., Walsh R.A., Moran C. 'Asleep' deep brain stimulation targeting ventral intermediate thalamus in essential tremor: systematic review // British Journal of Neurosurgery. — 2025. — P. 1–11. — DOI: 10.1080/02688697.2025.2565266.
5. Самсонов Д.В., Холявин А.И., Иришина Ю.А. Микрорекординг при операциях DBS: сравнение данных нейрофизиологии и нейронавигации // Российский нейрохирургический журнал имени проф. А. Л. Поленова. — 2024. — Т. 16. — С. 152–153.
6. Tugcu B., Hasimoglu O. Electrophysiological recording in deep brain stimulation: current status // Deep Brain Stimulation. — 2024. — Vol. 4. — P. 32–35. — DOI: 10.1016/j.jdbs.2023.12.005.
7. Du G., Zhuang P., Hallett M. и др. Properties of oscillatory neuronal activity in the basal ganglia and thalamus in patients with Parkinson's disease // Translational Neurodegeneration. — 2018. — Vol. 7. — P. 17. — DOI: 10.1186/s40035-018-0123-y.
8. Soares M.I., Soares-Dos-Reis R., Rosas M.J. и др. Intraoperative microelectrode recording in Parkinson's disease subthalamic deep brain stimulation: analysis of clinical utility // Journal of Clinical Neuroscience. — 2019. — Vol. 69. — P. 104–108. — DOI: 10.1016/j.jocn.2019.08.021.
9. Chuang T.C., Tan J.Q., Chen S.M. Comparison of intraoperative imaging guided versus microelectrode recording guided deep brain stimulation for Parkinson's disease: a meta-analysis // Neurocirugia. — 2023. — Vol. 34, № 5. — P. 228–237. — DOI: 10.1016/j.neucie.2022.09.003.
10. Асриянц С.В., Томский А.А., Гамалея А.А., Седов А.С., Пронин И.Н. Сравнение границ субталамического ядра по данным МРТ с высоким пространственным разрешением и интраоперационной микроэлектродной регистрации // Медицинская визуализация. — 2022. — Т. 26, № 2. — С. 10–17. — DOI: 10.24835/1607-0763-1073.
11. Zhang C., Wu B., Xian W. и др. Microelectrode recording-guided globus pallidus pars internus deep brain stimulation treats dystonia under general anaesthesia: a retrospective experience of one center // Acta Neurochirurgica. — 2025. — Vol. 167, № 1. — P. 184. — DOI: 10.1007/s00701-025-06595-4.
12. Chang E.F., Turner R.S., Ostrem J.L. и др. Neuronal responses to passive movement in the globus pallidus internus in primary dystonia // Journal of Neurophysiology. — 2007. — Vol. 98, № 6. — P. 3696–3707. — DOI: 10.1152/jn.00594.2007.
13. Sharma V.D., Bezchlibnyk Y.B., Isbaine F. и др. Clinical outcomes of pallidal deep brain stimulation for dystonia implanted using intraoperative MRI // Journal of Neurosurgery. — 2019. — Vol. 133, № 5. — P. 1582–1594. — DOI: 10.3171/2019.6.JNS19548.
14. Barow E., Neumann W.J., Brücke C. и др. Deep brain stimulation suppresses pallidal low frequency activity in patients with phasic dystonic movements // Brain. — 2014. — Vol. 137, Pt. 11. — P. 3012–3024. — DOI: 10.1093/brain/awu258.
15. Milosevic L., Kalia S.K., Hodaie M. и др. Physiological mechanisms of thalamic ventral intermediate nucleus stimulation for tremor suppression // Brain. — 2018. — Vol. 141, № 7. — P. 2142–2155. — DOI: 10.1093/brain/awy139.
16. Salanova V., Sperling M.R., Gross R.E. и др. The SANTÉ study at 10 years of follow-up: effectiveness, safety, and sudden unexpected death in epilepsy // Epilepsia. — 2021. — Vol. 62, № 6. — P. 1306–1317. — DOI: 10.1111/epi.16895.
17. Yan H., Wang X., Yu T. и др. The anterior nucleus of the thalamus plays a role in the epileptic network // Annals of Clinical and Translational Neurology. — 2022. — Vol. 9, № 12. — P. 2010–2024. — DOI: 10.1002/acn3.51693.
18. Möttönen T., Katisko J., Haapasalo J. и др. The correlation between intraoperative microelectrode recording and 3-Tesla MRI in patients undergoing ANT-DBS for refractory epilepsy // Stereotactic and Functional Neurosurgery. — 2016. — Vol. 94, № 2. — P. 86–92. — DOI: 10.1159/000444761.
19. Ho J.C., Aung T., Damiani A. и др. Refining centromedian nucleus stimulation for generalized epilepsy with targeting and mechanistic insights from intraoperative electrophysiology // Nature Communications. — 2025. — Vol. 16. — P. 5272. — DOI: 10.1038/s41467-025-60183-9.

© Кокшарова Татьяна Сергеевна (koksharova-tanya@mail.ru); Холявин Андрей Иванович (Kholyavin@mail.ru);
Самсонов Даниил Валерьевич (office@ihb.spb.ru); Кальменс Вячеслав Яковлевич (Vjkalmens@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.22

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНАЦИИ МИОИНОЗИТОЛА, D-ХИРОИНОЗИТОЛА В СООТНОШЕНИИ 5:1 И ПИКОЛИНАТА ХРОМА У ЖЕНЩИН С СИНДРОМОМ ПОЛИКИСТОЗНЫХ ЯИЧНИКОВ

RESULTS OF THE USE OF A COMBINATION OF MYO-INOSITOL AND D-CHIRO-INOSITOL IN A 5:1 RATIO WITH CHROMIUM PICOLINATE IN WOMEN WITH POLYCYSTIC OVARY SYNDROME

L. Mamontova
I. Korotkikh

Summary. Polycystic ovary syndrome (PCOS) is one of the most common endocrine disorders in women of reproductive age, accompanied by insulin resistance, hyperandrogenism, anovulation, and abdominal obesity, which significantly reduces fertility. The present study assessed the clinical and metabolic efficacy of a comprehensive nutritional support regimen combining myo-inositol (MI) and D-chiro-inositol (DCI) in a 5:1 ratio with chromium picolinate against the background of lifestyle modification. During 2024, at medical institutions in Voronezh and Tambov, 160 women aged 18 to 35 years with excess body weight, menstrual cycle disorders, and anovulation were examined and divided into two groups of 80 subjects: the main group received a combination of MI (1000 mg) and DCI (200 mg) twice daily together with chromium picolinate (200 μg) once daily, while the comparison group received only the inositol combination at the same dosage; the treatment duration was six months. Upon completion, the main group demonstrated a more pronounced decrease in body mass index (3.2 kg/m^2 vs. 2.1 kg/m^2), waist circumference (6.5 cm vs. 4.2 cm), fasting glucose (0.8 mmol/L vs. 0.4 mmol/L), HOMA-IR index (from 4.8 to 2.7 vs. from 4.6 to 3.3), and free testosterone levels (39.6 % vs. 25.5 %); regular menstrual cycles were restored in 72.5 % of the main group patients and 55.0 % of the comparison group, confirmed ovulation — in 60.0 % and 40.0 %, respectively. The results demonstrate a synergistic effect of chromium picolinate and inositols, attributed to their action on different links of the insulin signaling pathway: chromium enhances insulin receptor activity, while inositols normalize post-receptor signal transduction, which allows considering this combination as a pathogenetically justified component of the first-line therapy for PCOS in women with excess body weight and insulin resistance.

Keywords: polycystic ovary syndrome, myo-inositol, D-chiro-inositol, chromium picolinate, insulin resistance, anovulation, lifestyle modification.

Мамонтова Лейла Николаевна
Аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н. Бурденко» Министерства здравоохранения Российской Федерации
leyla.mamontova.96@inbox.ru
Коротких Ирина Николаевна
доктор медицинских наук, профессор, заслуженный врач Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н. Бурденко» Министерства здравоохранения Российской Федерации
korotkikh_1950@mail.ru

Аннотация. Синдром поликистозных яичников (СПЯ) является одним из наиболее распространённых эндокринных заболеваний у женщин репродуктивного возраста, сопровождающимся инсулинорезистентностью, гиперандрогенией, ановуляцией и абдоминальным ожирением, что существенно снижает фертильность. В настоящем исследовании оценена клиническая и метаболическая эффективность комплексной нутритивной поддержки в виде комбинации миоинозитола (МИ) и D-хироинозитола (ДХИ) в соотношении 5:1 с добавлением пиколината хрома на фоне модификации образа жизни. В течение 2024 года на базе медицинских учреждений Воронежа и Тамбова обследованы 160 женщин в возрасте от 18 до 35 лет с избыточной массой тела, нарушениями менструального цикла и ановуляцией, разделённых на две группы по 80 человек: основная группа получала комбинацию МИ (1000 мг) и ДХИ (200 мг) дважды в день совместно с пиколинатом хрома (200 мкг) однократно в день, группа сравнения — только комбинацию инозитолов в аналогичной дозировке; длительность терапии составила шесть месяцев. После завершения курса в основной группе зафиксировано более выраженное снижение индекса массы тела (на 3,2 кг/м^2 против 2,1 кг/м^2), окружности талии (на 6,5 см против 4,2 см), уровня глюкозы натощак (на 0,8 ммоль/л против 0,4 ммоль/л), индекса HOMA-IR (с 4,8 до 2,7 против снижения с 4,6 до 3,3), а также уровня свободного тестостерона (на 39,6 % против 25,5 %); регулярный менструальный цикл восстановился у 72,5 % пациенток основной группы и у 55,0 % группы сравнения, подтверждённая овуляция — у 60,0 % и 40,0 % соответственно. Полученные результаты демонстрируют синергичный эффект пиколината хрома и инозитолов, обусловленный воздействием на разные звенья инсулинового сигналинга: хром усиливает активность инсулинового рецептора, тогда как инозитолы нормализуют пострецепторную передачу сигнала, что позволяет рассматривать данную комбинацию в качестве патогенетически обоснованного компонента первого этапа терапии СПЯ у женщин с избыточной массой тела и инсулинорезистентностью.

Ключевые слова: синдром поликистозных яичников, миоинозитол, D-хироинозитол, пиколинат хрома, инсулинорезистентность, ановуляция, модификация образа жизни.

В настоящее время синдром поликистозных яичников (СПЯ) представляет собой часто встречающееся гинекологическое заболевание, которое сопровождается разнообразными эндокринными нарушениями и является одной из главных причин проблем с зачатием у женщин детородного возраста [1]. Здоровье женской репродуктивной системы во многом зависит от состояния эндокринной системы. Гормональный дисбаланс может повлиять на менструальный цикл, овуляцию, развитие фолликулов и качество яйцеклеток, что, в свою очередь, может снизить фертильность. Состояние желёз внутренней секреции влияет на липидный профиль, чувствительность к инсулину, обмен веществ и индекс массы тела (ИМТ) женщин, а нарушение этих показателей может негативно сказаться на репродуктивном здоровье.

В 70 % случаев у женщин, страдающих СПЯ, наблюдается инсулинорезистентность [3]. Это состояние может быть вызвано нарушением в сигнальных путях инсулинового рецептора после его связывания. Повышенный уровень инсулина может стимулировать выработку лютеинизирующего гормона, что влияет на функционирование яичников. Кроме того, гиперинсулинемия может снижать синтез глобулина, связывающего половые гормоны, в печени, что приводит к повышению уровня андрогенов в организме женщины. Согласно исследованиям [5], у женщин с СПЯ наблюдается снижение чувствительности к инсулину вне зависимости от индекса массы тела.

Избыточная масса тела является одним из основных факторов, способствующих развитию СПЯ. У 30–70 % женщин с данным синдромом наблюдается избыточный вес, а ИМТ более 28,0 кг/м^2 часто ассоциирован с развитием заболевания [2]. При этом речь идёт преимущественно об абдоминальном ожирении, характеризующемся избыточным накоплением жировой ткани в области живота — в брыжейке кишечника, сальнике, средостении, забрюшинном пространстве и периваскулярных зонах [6]. Существует очевидная корреляция между абдоминальным ожирением, инсулинорезистентностью и повышенным уровнем андрогенов. Похудение является ключевым элементом терапии СПЯ, поскольку способствует устранению нарушений менструального цикла, бесплодия и гирсутизма [4].

Механизм влияния ожирения на процесс овуляции остаётся дискуссионным. У женщин с избыточным весом гиперандрогенемия, вызванная повышенным уровнем инсулина, может приводить к гибели клеток яичников. Инсулин стимулирует выработку эстрогена в яичниках и усиливает действие фолликулостимулирующего гормона (ФСГ), отвечающего за выработку эстрадиола и прогестерона [7]. Избыток андрогенных веществ может нарушить баланс эстрогенов в развивающемся фолликуле. Лютеинизирующий гормон (ЛГ) стимулирует стероидогенез и подавляет дальнейшее деление клеток и их окончательную дифференциацию в преовуляторном фолликуле [8]. Избыток эстрогенов из-за повышенной периферической секреции нарушает работу гипоталамо-гипофизарно-яичниковой оси, а совокупное воздействие избытка эстрогенов и андрогенов может приводить к ановуляции [9].

Применение комбинации инозитолов — миоинозитола (МИ) и D-хироинозитола (ДХИ) — показало значительные результаты в снижении массы тела, увеличении частоты овуляции и повышении вероятности наступления беременности [10]. Инозитолы — витаминоподобные вещества, представляющие собой простые сахара [11], содержащиеся в фруктах, бобовых, зерновых и орехах; кроме того, организм способен к их эндогенному синтезу [12]. МИ и ДХИ являются вторичными посредниками, участвующими в передаче сигналов от рецепторов ФСГ, ЛГ, гонадотропин-рилизинг-гормона и инсулина, регулируя синтез и действие половых гормонов и инсулина [13, 14]. У женщин с СПЯ отмечается избыточная потеря ДХИ с мочой [15], что может способствовать формированию инсулинорезистентности.

Каждый из изомеров инозитола оказывает влияние на различные аспекты метаболизма углеводов и гормонального баланса, в связи с чем использование комбинации МИ и ДХИ может быть более эффективным, чем применение одного МИ, приводя к улучшению метаболических показателей — снижению уровня инсулина, холестерина и маркеров воспаления [14, 16–18]. Инозитолы способны влиять на выработку грелина, что может способствовать снижению аппетита [14], и характеризуются высокой биодоступностью при пероральном приёме [19, 20]. Хром является важным микроэлементом для поддержания гомеостаза глюкозы и инсулина [23]. Особенно эффективен хром в форме пиколината [21, 22]. Научные исследования показали, что ежедневное потребление хрома в количестве от 200 до 1000 мкг в виде пиколината хрома способствует снижению уровня глюкозы в крови [22]. Принимая во внимание вышесказанное, актуальным представляется исследование комбинации МИ и ДХИ в соотношении 5:1 в сочетании с пиколинатом хрома в дозировке 200 мкг у женщин с избыточным весом в процессе модификации образа жизни в рамках терапии СПЯ.

Цель исследования — оценить клиническую и метаболическую эффективность комплексной нутритивной поддержки в виде комбинации миоинозитола и D-хироинозитола в соотношении 5:1 с добавлением пиколината хрома на фоне модификации образа жизни у женщин репродуктивного возраста с СПЯ, избыточной массой тела и ановуляцией.

Открытое проспективное сравнительное исследование выполнено в течение 2024 года на базе женских консультаций и гинекологических отделений медицинских учреждений Воронежа и Тамбова. Протокол исследования был одобрен локальным этическим комитетом ФГБОУ ВО «ВГМУ им. Н.Н. Бурденко» Минздрава России; от каждой участницы было получено письменное информированное согласие.

В исследование были включены 160 женщин репродуктивного возраста (от 18 до 35 лет) с диагнозом СПЯ, установленным в соответствии с Роттердамскими критериями (2003): наличие не менее двух из трёх признаков — олиго— или ановуляция, клинические и/или биохимические признаки гиперандрогении, поликистозная морфология яичников по данным ультразвукового исследования (объём яичника > 10 мл и/или ≥ 12 фолликулов диаметром 2–9 мм) при исключении иных причин гиперандрогении и ановуляции [21]. Критерии включения: нарушения менструального цикла по типу олигоменореи (длительность цикла > 35 дней) или аменореи (отсутствие менструаций > 3 мес.); избыточная масса тела или ожирение (ИМТ ≥ 25,0 кг/м^2); окружность талии > 80 см; отсутствие приёма гормональных препаратов (комбинированных оральных контрацептивов, глюкокортикоидов, препаратов тиреоидных гормонов) в течение не менее трёх месяцев до включения в исследование; подтверждённая ановуляция по данным серийного ультразвукового мониторинга фолликулогенеза и уровня прогестерона на 21–23-й день цикла (< 3 нг/мл). Критерии исключения: сахарный диабет 1-го или 2-го типа; патология щитовидной железы с нескомпенсированной дисфункцией; врождённая дисфункция коры надпочечников; гиперпролактинемия; хирургические заболевания органов малого таза, требующие оперативного лечения; приём метформина или иных инсулиносенситайзеров; приём препаратов хрома; тяжёлая соматическая патология, требующая постоянной медикаментозной терапии; беременность или лактация.

Методом простой рандомизации (с использованием генератора случайных чисел) пациентки были распределены в две группы по 80 человек. Женщинам обеих групп в качестве базисной терапии назначалась модификация образа жизни: гипокалорийная диета с дефицитом 500–700 ккал/сут от расчётной суточной потребности, ограничение простых углеводов и насыщенных жиров, увеличение потребления клетчатки; аэробная физическая нагрузка умеренной интенсивности не менее 150 мин в неделю (ходьба, плавание, велотренажёр). Рекомендации по диете и физической активности были стандартизированы и выданы каждой участнице в виде индивидуальной памятки; контроль комплаентности осуществлялся на ежемесячных визитах. Пациентки основной группы (группа I, n = 80) дополнительно получали комбинацию МИ 1000 мг и ДХИ 200 мг (соотношение 5:1) два раза в день после приёма пищи, а также пиколинат хрома 200 мкг один раз в день во время еды. Пациентки группы сравнения (группа II, n = 80) получали только комбинацию МИ 1000 мг и ДХИ 200 мг (соотношение 5:1) два раза в день после приёма пищи. Длительность терапии в обеих группах составила шесть месяцев. Приём нутрицевтических комплексов начинался независимо от дня менструального цикла. На период исследования участницам было рекомендовано использование барьерных методов контрацепции.

Обследование проводилось исходно (визит 0), через три месяца (визит 1) и через шесть месяцев (визит 2). Антропометрические параметры включали измерение массы тела (электронные медицинские весы, точность ± 0,1 кг), роста (стадиометр), расчёт ИМТ и измерение окружности талии (ОТ) на уровне середины расстояния между нижним краем рёберной дуги и верхним краем подвздошного гребня. Лабораторное обследование выполнялось утром натощак (после 10–12 часов голодания) и включало: определение глюкозы плазмы венозной крови глюкозооксидазным методом; иммунореактивного инсулина методом хемилюминесцентного иммуноанализа; расчёт индекса HOMA-IR по формуле: глюкоза натощак (ммоль/л) × инсулин натощак (мкЕд/мл) / 22,5; определение уровней свободного тестостерона методом иммуноферментного анализа; ФСГ и ЛГ хемилюминесцентным методом на 2–5-й день менструального цикла (при наличии менструаций) либо в произвольный день (при аменорее). Ультразвуковой мониторинг фолликулогенеза проводился трансвагинальным датчиком (частота 5–9 МГц) на 10, 12, 14-й день цикла; овуляция подтверждалась визуализацией доминантного фолликула ≥ 18 мм с последующим его исчезновением и появлением жёлтого тела, а также уровнем прогестерона > 3 нг/мл на 21–23-й день цикла. Регулярность менструального цикла оценивалась по дневникам менструаций, которые пациентки вели на протяжении всего периода наблюдения; цикл считался регулярным при длительности 24–38 дней в течение последних трёх циклов к моменту завершения исследования. За весь период наблюдения из исследования выбыли 7 пациенток (4 из группы I, 3 из группы II): 3 — в связи с нарушением протокола (самостоятельное начало приёма метформина), 2 — по причине переезда, 2 — в связи с утратой контакта. Анализ результатов проведён по данным 153 завершивших исследование пациенток (76 в группе I, 77 в группе II).

Статистическая обработка данных выполнена с использованием программного пакета Statistica 10.0 (StatSoft Inc., USA) и IBM SPSS Statistics 26.0. Нормальность распределения количественных переменных оценивалась критерием Шапиро–Уилка. Для параметрически распределённых величин использовались среднее арифметическое и стандартное отклонение (M ± SD), межгрупповые сравнения проводились с помощью

t-критерия Стьюдента для независимых выборок, внутригрупповая динамика — парного t-критерия. Для непараметрических данных применялись медиана и межквартильный размах (Me [Q1; Q3]), критерий Манна–Уитни для межгрупповых сравнений и критерий Вилкоксона для внутригрупповых. Сравнение качественных признаков (доля пациенток с овуляцией, регулярным циклом, нарушенной толерантностью к глюкозе) проводилось с помощью критерия χ^2 Пирсона с поправкой Йейтса. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Исходные клинико-лабораторные характеристики пациенток обеих групп были сопоставимы по всем анализируемым параметрам (табл. 1), что свидетельствует о корректности проведённой рандомизации.

Таблица 1.

Исходные характеристики пациенток (визит 0, M ± SD)

Показатель	Группа I (n = 76)	Группа II (n = 77)	p
Возраст, лет	27,4 ± 4,1	26,9 ± 4,3	0,46
ИМТ, кг/м²	31,6 ± 3,4	31,2 ± 3,1	0,44
Окружность талии, см	96,3 ± 8,7	95,8 ± 8,2	0,71
Глюкоза натощак, ммоль/л	5,9 ± 0,6	5,8 ± 0,7	0,34
Инсулин натощак, мкЕд/мл	18,4 ± 5,2	17,9 ± 4,8	0,53
Индекс HOMA-IR	4,8 ± 1,3	4,6 ± 1,2	0,32
Свободный тестостерон, пг/мл	4,8 ± 1,1	4,7 ± 1,0	0,56
ЛГ, мМЕ/мл	12,8 ± 3,6	12,4 ± 3,4	0,47
ФСГ, мМЕ/мл	4,0 ± 1,1	4,1 ± 1,0	0,55
ЛГ/ФСГ	3,2 ± 0,8	3,1 ± 0,7	0,40
НТГ, n (%)	31 (40,8%)	30 (39,0%)	0,82

Примечание: НТГ — нарушенная толерантность к глюкозе; p — уровень значимости межгрупповых различий (t-критерий Стьюдента для количественных, χ^2 для качественных показателей).

После шести месяцев терапии в обеих группах зафиксирована положительная динамика основных антропометрических, метаболических и гормональных показателей; вместе с тем в группе I изменения были статистически значимо более выраженными по большинству параметров (табл. 2).

Как следует из данных табл. 2, среднее снижение ИМТ в группе I составило 3,2 кг/м², в группе II — 2,1 кг/м² (p = 0,008). Окружность талии уменьшилась на 6,5 см и 4,2 см соответственно (p = 0,012). Улучшение показателей углеводного обмена было более значимым в основной группе: уровень глюкозы натощак снизился в среднем на 0,8 ммоль/л против 0,4 ммоль/л (p = 0,001); уровень

Таблица 2.

Динамика клинико-лабораторных показателей через 6 месяцев терапии (M ± SD)

Показатель	Группа I (n = 76)		Группа II (n = 77)		p*
	Исходно	Через 6 мес.	Исходно	Через 6 мес.	
ИМТ, кг/м²	31,6 ± 3,4	28,4 ± 3,0†	31,2 ± 3,1	29,1 ± 2,9†	0,008
ОТ, см	96,3 ± 8,7	89,8 ± 7,4†	95,8 ± 8,2	91,6 ± 7,8†	0,012
Глюкоза натощак, ммоль/л	5,9 ± 0,6	5,1 ± 0,5†	5,8 ± 0,7	5,4 ± 0,6†	0,001
Инсулин натощак, мкЕд/мл	18,4 ± 5,2	11,9 ± 3,8†	17,9 ± 4,8	13,8 ± 4,2†	0,003
Индекс HOMA-IR	4,8 ± 1,3	2,7 ± 0,9†	4,6 ± 1,2	3,3 ± 1,0†	0,001
Свободный тестостерон, пг/мл	4,8 ± 1,1	2,9 ± 0,8†	4,7 ± 1,0	3,5 ± 0,9†	0,001
ЛГ, мМЕ/мл	12,8 ± 3,6	8,3 ± 2,4†	12,4 ± 3,4	9,7 ± 2,8†	0,001
ФСГ, мМЕ/мл	4,0 ± 1,1	4,6 ± 1,0	4,1 ± 1,0	4,3 ± 1,1	0,07
ЛГ/ФСГ	3,2 ± 0,8	1,8 ± 0,5†	3,1 ± 0,7	2,3 ± 0,6†	0,001
НТГ, n (%)	31 (40,8 %)	11 (14,5 %)†	30 (39,0 %)	18 (23,4 %)†	0,16
Регулярный МЦ, n (%)	0 (0 %)	55 (72,4 %)†	0 (0 %)	42 (54,5 %)†	0,02
Подтверждённая овуляция, n (%)	0 (0 %)	46 (60,5 %)†	0 (0 %)	31 (40,3 %)†	0,01

Примечание: † — p < 0,05 по сравнению с исходным значением внутри группы (парный t-критерий / критерий Вилкоксона); p* — уровень значимости межгрупповых различий по абсолютной величине изменения (Δ) показателя (t-критерий Стьюдента для количественных, χ^2 для качественных показателей); МЦ — менструальный цикл; НТГ — нарушенная толерантность к глюкозе.

инсулина натощак — на 6,5 мкЕд/мл против 4,1 мкЕд/мл (p = 0,003). Индекс HOMA-IR в группе I снизился на 2,1 единицы (с 4,8 до 2,7), в группе II — на 1,3 единицы (с 4,6 до 3,3), что свидетельствует о более эффективном восстановлении чувствительности к инсулину при добавлении пиколината хрома (p = 0,001). Количество пациенток с нарушенной толерантностью к глюкозе сократилось в группе I с 40,8 % до 14,5% (на 64,5 %), в группе II — с 39,0 % до 23,4 % (на 40,0 %); межгрупповое различие не достигло статистической значимости (p = 0,16), что может быть обусловлено недостаточной мощностью исследования для данного бинарного исхода.

Уровень свободного тестостерона достоверно снизился в обеих группах, однако в группе I снижение составило 39,6 % (с 4,8 до 2,9 пг/мл), тогда как в группе II — 25,5 % (с 4,7 до 3,5 пг/мл; p = 0,001). Соотношение ЛГ/ФСГ нормализовалось у большего числа пациенток группы I, снизившись в среднем с 3,2 до 1,8 против снижения с 3,1 до 2,3 в группе II (p = 0,001). Уровень ФСГ демонстрировал тенденцию к повышению в обеих группах, однако межгрупповая разница оказалась статистически незначимой (p = 0,07).

Восстановление менструальной и овуляторной функции — центральный репродуктивный исход настоящего исследования — происходило достоверно чаще в группе I. Регулярный менструальный цикл к концу наблюдения восстановился у 72,4 % пациенток группы I и у 54,5 % группы II (p = 0,02). Подтверждённая овуляция зафиксирована у 60,5 % и 40,3 % женщин соответственно (p = 0,01). Серьёзных нежелательных явлений, связанных с приёмом нутрицевтических комплексов, зарегистрировано не было. Отмечались единичные случаи кратковременной тошноты (n = 4 в группе I, n = 3 в группе II) и абдоминального дискомфорта (n = 2 в группе I), которые не потребовали отмены препаратов и самостоятельно купировались в течение первых двух недель приёма.

Полученные результаты согласуются с данными современных научных публикаций и подтверждают высокий терапевтический потенциал инозитолов в комплексном лечении СПЯ. Восстановление чувствительности тканей к инсулину является краеугольным камнем в коррекции как метаболических, так и репродуктивных нарушений при данном синдроме. Применение комбинации МИ и ДХИ в физиологическом соотношении 5:1 позволяет воздействовать на разные звенья инсулинового сигналинга, что подтвердилось достоверным улучшением показателей углеводного обмена и снижением уровня андрогенов в обеих группах.

Ключевым выводом работы является демонстрация синергичного эффекта от добавления пиколината хрома к терапии инозитолами. Статистически значимые межгрупповые различия в динамике ИМТ, окружности талии, HOMA-IR и свободного тестостерона (табл. 2) указывают на то, что хром существенно усиливает метаболическое действие инозитолов. Биохимическое обоснование этого синергизма заключается в том, что хром, образуя комплекс хромодулин с инсулиновым рецептором, усиливает его тирозинкиназную активность, в то время как инозитолы, выступая в роли вторичных посредников инсулинового сигнала, нормализуют пострецепторную передачу через фосфатидилинозитол-3-киназный путь. Таким образом, два компонента комбинации действуют на последовательных этапах единого сигнального каскада, что объясняет наблюдаемый аддитивный эффект. Более выраженное снижение висцерального жира в группе I имеет важное клиническое значение, так как способствует разрыву порочного круга, связывающего абдоминальное ожирение, инсулинорезистентность и гиперандрогению.

Важнейшим клиническим результатом стало значимо более частое восстановление овуляторной функции в основной группе — прямое следствие улучшения метаболического фона и снижения уровня андрогенов. Устранение инсулинорезистентности снижает патологическую стимуляцию тека-клеток яичников, нормализует интрафолликулярный баланс эстрогенов и андрогенов, создавая условия для селекции доминантного фолликула, его созревания и полноценной овуляции. Данные результаты согласуются с работами Wojciechowska и соавт. [10], продемонстрировавших положительное влияние инозитолов на эндокринно-метаболический профиль при СПЯ, и расширяют их за счёт обоснования преимущества трёхкомпонентной схемы.

Ограничениями настоящего исследования являются его открытый дизайн, отсутствие плацебо-контроля, относительно небольшой объём выборки и период наблюдения шесть месяцев, не позволяющий оценить отдалённые результаты, в том числе частоту наступления и исходы беременности. Кроме того, оценка комплаентности в отношении модификации образа жизни основывалась на самоотчётах пациенток, что допускает возможность систематической ошибки. Дальнейшие рандомизированные плацебо-контролируемые исследования с бóльшим объёмом выборки и продлённым периодом наблюдения позволят уточнить место данной комбинации в алгоритмах лечения СПЯ.

Проведённое исследование позволяет сделать следующие выводы. Применение комбинации миоинозитола и D-хироинозитола в соотношении 5:1 на фоне модификации образа жизни у женщин с СПЯ, избыточной массой тела и ановуляцией в течение шести месяцев приводит к достоверному улучшению метаболических и эндокринных показателей, а также способствует восстановлению регулярного менструального цикла и овуляции. Добавление пиколината хрома к терапии комбинацией инозитолов потенцирует её метаболические эффекты, что проявляется в статистически значимом более выраженном снижении ИМТ (p = 0,008), окружности талии (p = 0,012), индекса HOMA-IR (p = 0,001) и уровня свободного тестостерона (p = 0,001) по сравнению с группой, получавшей только инозитолы. Комплексный подход, включающий комбинацию миоинозитола, D-хироинозитола и пиколината хрома, демонстрирует значимо более высокую эффективность в восстановлении овуляторной функции (60,5 % против 40,3 %, p = 0,01), что является ключевым репродуктивным исходом для женщин, планирующих беременность. Представленная схема нутритивной поддержки характеризуется хорошей переносимостью

и высоким профилем безопасности. На основании полученных данных можно рекомендовать включение комбинации миоинозитола и D-хироинозитола в соотношении 5:1 с пиколинатом хрома в программу первого этапа лечения женщин репродуктивного возраста с СПЯ, ассоциированным с избыточной массой тела и инсулинорезистентностью.

Благодарности. Авторы выражают благодарность всем участницам исследования, а также медицинскому персоналу клинических баз за помощь в организации и проведении работы.

Финансирование. Исследование не имело специального целевого финансирования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бхаттачарья К., Сенгупта П., Дутта С. и др. Соотношение объёма талии к росту и индекс массы тела как прогностические маркеры инсулинорезистентности у женщин с СПКЯ в Калькутте, Индия // Эндокринология. 2021. Т. 72. С. 86–95.
2. Вартанян Э.В., Цатурова К.А., Девятова Е.А. и др. Резервы улучшения качества ооцитов при синдроме поликистозных яичников // Проблемы репродукции. 2017. Т. 23. № 3. С. 50–54.
3. Barber T.M., McCarthy M.I., Wass J.A., Franks S. Obesity and polycystic ovary syndrome // Clin. Endocrinol. (Oxf). 2006. Vol. 65. No. 2. P. 137–145.
4. Vrbikova J., Hainer V. Obesity and polycystic ovary syndrome // Obesity Facts. 2009. Vol. 2. No. 1. P. 26–35.
5. Venkatesan A.M., Dunaif A., Corbould A. Insulin resistance in polycystic ovary syndrome: progress and paradoxes // Recent Prog. Horm. Res. 2001. Vol. 56. P. 295–308.
6. Gomes-Serrano M., Ponath V., Preuβer C., von Strandmann E.P. Beyond the extracellular vesicles: technical hurdles, achieved goals and current challenges when working on adipose cells // Int. J. Mol. Sci. 2021. Vol. 22. No. 7. P. 2262.
7. Willis D., Mason H., Gilling-Smith C., Franks S. Modulation by insulin of follicle stimulating hormone and luteinizing hormone action in human granulosa cells from normal and polycystic ovaries // J. Clin. Endocrinol. Metab. 1998. Vol. 81. No. 1. P. 302–309.
8. Hillier S.G. Current concepts of the roles of follicle stimulating hormone and luteinizing hormone in folliculogenesis // Hum. Reprod. 1994. Vol. 99. No. 2. P. 188–191.
9. Чернуха Г.Е., Табеева Г.И., Удовиченко М.А. Неиспользованные возможности коррекции эндокринно-метаболических нарушений при синдроме поликистозных яичников // Акушерство и гинекология. 2019. № 10. С. 140–147.
10. Wojciechowska A., Osowski A., Jóźwik M. et al. Inositols' importance in the improvement of the endocrine-metabolic profile in PCOS // Int. J. Mol. Sci. 2019. Vol. 20. No. 22. P. 5787.
11. Dinicola S., Minini M., Unfer V. et al. Nutritional and acquired deficiencies in inositol bioavailability. Correlations with metabolic disorders // Int. J. Mol. Sci. 2017. Vol. 18. No. 10. P. 2187.
12. Brown L.D., Cheung A., Harwood J.E., Battaglia F.C. Inositol and mannose utilization rates in term and late-preterm infants exceed nutritional intakes // J. Nutr. 2009. Vol. 139. P. 1648–1652.
13. Larner J., Brautigan D.L., Thorner M.O. D-chiro-inositol glycans in insulin signaling and insulin resistance // Mol. Med. 2010. Vol. 16. No. 11–12. P. 543–552.
14. Торшин И.Ю., Майорова Л.А., Уварова Е.В. и др. Хемореактомный анализ стереоизомеров инозитола: различные профили фармакологического действия миоинозитола и D-хироинозитола при нарушениях женской репродуктивной системы // Вопросы акушерства, гинекологии и перинатологии. 2020. № 5 (19).
15. Baillargeon J.-P., Diamanti-Kandarakis E., Ostlund R. et al. Altered D-chiro-inositol urinary clearance in women with polycystic ovary syndrome // Diabetes Care. 2006. Vol. 29. No. 2. P. 300–305.
16. Nordio M., Proietti E. The combined therapy with myo-inositol and D-chiro-inositol reduces the risk of metabolic disease in PCOS overweight patients compared to myo-inositol supplementation alone // Eur. Rev. Med. Pharmacol. Sci. 2012. Vol. 16. No. 5. P. 575–581.
17. Bizzarri M., Carlomagno G. Inositol: history of an effective therapy for polycystic ovary syndrome // Eur. Rev. Med. Pharmacol. Sci. 2014. Vol. 18. No. 13. P. 1896–1903.
18. Laganà A.S., Garzon S., Casarin J. et al. Inositol in polycystic ovary syndrome: restoring fertility through a pathophysiology-based approach // Trends Endocrinol. Metab. 2018. Vol. 29. No. 11. P. 768–780.
19. Teede H.J., Misso M.L., Costello M.F. et al. Recommendations from the international evidence-based guideline for the assessment and management of polycystic ovary syndrome // Fertil. Steril. 2018. Vol. 110. No. 3. P. 364–379.
20. Pintaudi B., Di Vieste G., Bonomo M. The effectiveness of myo-inositol and D-chiro-inositol treatment in type 2 diabetes // Int. J. Endocrinol. 2016. Vol. 2016. P. 9132052.
21. Azziz R., Carmina E., Dewailly D. et al. Positions statement: criteria for defining polycystic ovary syndrome as a predominantly hyperandrogenic syndrome: an Androgen Excess Society guideline // J. Clin. Endocrinol. Metab. 2006. Vol. 91. No. 11. P. 4237–4245.
22. Diamanti-Kandarakis E., Economou F., Palimeri S., Christakou C. Metformin in polycystic ovary syndrome // Ann. N. Y. Acad. Sci. 2010. Vol. 1205. P. 192–198.
23. Moran L.J., Misso M.L., Wild R.A., Norman R.J. Impaired glucose tolerance, type 2 diabetes and metabolic syndrome in polycystic ovary syndrome: a systematic review and meta-analysis // Hum. Reprod. Update. 2010. Vol. 16. No. 4. P. 347–363.

© Мамонтова Лейла Николаевна (leyla.mamontova.96@inbox.ru); Коротких Ирина Николаевна (korotkikh_1950@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.25

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ СКРИНИНГА ГЕСТАЦИОННОГО САХАРНОГО ДИАБЕТА

COMPARISON OF THE EFFECTIVENESS OF VARIOUS SCREENING METHODS FOR GESTATIONAL DIABETES MELLITUS

A. Sizov

Summary. The article presents an analysis of two main screening strategies for gestational diabetes mellitus (GDM) — one-stage and two-stage. The purpose of the article is to compare the effectiveness of single–stage and two-stage methods of GSD screening based on the analysis of data from large randomized trials, systematic reviews and clinical recommendations in key indicators: diagnostic value, compliance, impact on obstetric outcomes and economic feasibility. The relevance of the topic is due to the lack of consensus on the most effective method of diagnosing GDM in global and domestic obstetrics. A review of data from various Russian and foreign studies involving pregnant women, as well as an analysis of systematic reviews and clinical recommendations, has been conducted. The paper compares the methods according to the following parameters: the frequency of detection of GDM, patient compliance, the risk of adverse outcomes for mother and fetus, as well as economic efficiency. It has been shown that the one-stage approach makes it possible to detect GDM twice as often, but two-stage screening demonstrates better patient adherence. At the same time, it was noted that the differences in the frequency of adverse outcomes between the groups were statistically insignificant. The author comes to the conclusion that the choice of the GDV screening method cannot be unambiguous and should be determined by the specific working conditions of the medical organization, the availability of laboratory facilities, the doctor's priorities and the characteristics of the pregnant population. With limited resources or low patient commitment, a two-step approach seems more justified, which, while maintaining acceptable sensitivity, provides significantly better compliance.

Keywords: gestational diabetes mellitus, screening, one-stage method, two-stage method, oral glucose tolerance test, pregnancy.

Сизов Алексей Викторович
кандидат медицинских наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный
педиатрический медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
avsizov@inbox.ru

Аннотация. В статье представлен анализ двух основных стратегий скрининга гестационного сахарного диабета (ГСД) — одноэтапного и двухэтапного. Цель статьи — на основе анализа данных крупных рандомизированных исследований, систематических обзоров и клинических рекомендаций провести сравнение эффективности одноэтапного и двухэтапного методов скрининга ГСД по ключевым показателям: диагностической ценности, комплаентности, влиянию на акушерские исходы и экономической целесообразности. Актуальность темы обусловлена отсутствием единого мнения о наиболее эффективном методе диагностики ГСД в мировом и отечественном акушерстве. Проведён обзор данных различных российских и зарубежных исследований с участием беременных женщин, а также анализ систематических обзоров и клинических рекомендаций. В работе выполнено сравнение методов по следующим параметрам: частота выявления ГСД, комплаентность пациенток, риск неблагоприятных исходов для матери и плода, а также экономическая эффективность. Показано, что одноэтапный подход позволяет выявить ГСД в два раза чаще, однако двухэтапный скрининг демонстрирует лучшую приверженность пациенток. При этом отмечено, что различия в частоте неблагоприятных исходов между группами статистически незначимы. Автор приходит к выводу, что выбор метода скрининга ГСД не может быть однозначным и должен определяться конкретными условиями работы медицинской организации, доступностью лабораторной базы, приоритетами врача и особенностями контингента беременных. При ограниченных ресурсах или низкой приверженности пациенток обследованию более оправданным представляется двухэтапный подход, который, сохраняя приемлемую чувствительность, обеспечивает значительно лучшую комплаентность.

Ключевые слова: гестационный сахарный диабет, скрининг, одноэтапный метод, двухэтапный метод, пероральный глюкозотолерантный тест, беременность.

Введение

В настоящее время гестационный сахарный диабет представляет собой одно из наиболее частых метаболических осложнений беременности. Данное заболевание связано с целым рядом неблагоприятных исходов для матери и плода. Так, у женщин с ГСД повышен риск гестационной гипертензии, многоводия, преэклампсии и родоразрешения путём кесарева сечения. Кроме того, дети, рождённые от матерей с ГСД, чаще имеют макросомию, дистоцию плечиков, преждевременные роды, неонатальную гипогликемию и респираторные нарушения [3, 9]. Актуальность темы обусловлена отсутствием единого мнения о наиболее эффективном методе диагностики ГСД в мировом и отечественном акушерстве. В Российской Федерации с 1 января 2025 года введены в действие обновлённые клинические рекомендации по диагностике и лечению ГСД, одобренные Министерством здравоохранения. Согласно этим рекомендациям, пероральный глюкозотолерантный тест (ПГТТ) с 75 г глюкозы проводится всем беременным без исключения в сроке 24–28 недель при

отсутствии противопоказаний [2]. Однако мировое медицинское сообщество до сих пор не пришло к согласию относительно оптимальной стратегии скрининга. В США, например, Американская коллегия акушеров и гинекологов (ACOG) рекомендует двухэтапный подход [4], тогда как Американская диабетическая ассоциация (ADA) отдаёт предпочтение одноэтапному методу [5].

Цель статьи — на основе анализа данных крупных рандомизированных исследований, систематических обзоров и клинических рекомендаций провести сравнение эффективности одноэтапного и двухэтапного методов скрининга ГСД по ключевым показателям: диагностической ценности, комплаентности, влиянию на акушерские исходы и экономической целесообразности.

Материалы и методы исследования

Материалами исследования послужили данные различных российских и зарубежных исследований с участием беременных женщин, а также систематических обзоров, клинических рекомендаций и научных статей российских и зарубежных авторов. Методы исследования: сравнение, описание, классификация, сопоставление, контент-анализ, табличный метод.

Результаты и обсуждения

Гестационный сахарный диабет, по данным международной статистики, в мире встречается в 14 %, причём этот показатель неуклонно растёт из года в год [9]. Такая распространённость говорит о необходимости качественной диагностики, которая в настоящее время выполняется двумя подходами — одноэтапный и двухэтапный. Главное различие между ними касается частоты диагностики ГСД. Согласно результатам крупного рандомизированного исследования, проведенного T.A. Hillier, K.L. Pedula, K.K. Ogasawara, K.K. Vesco, C.E.S. Oshiro, S.L. Lubarsky, J. Van Marter на почти 24 тыс. женщин из США, в группе одноэтапного скрининга гестационный диабет был выявлен у 16,5 % женщин, тогда как в группе двухэтапного скрининга — лишь у 8,5 % (относительный риск 1,94; 97,5 % доверительный интервал 1,79–2,11) [7]. Указанные данные свидетельствуют, что одноэтапный подход позволяет диагностировать ГСД почти вдвое чаще. Это подтверждается и другими исследованиями. Как отмечают Sarker M.R., Ramos G.A., использование одноэтапного скрининга приводит к увеличению выявляемости ГСД без значимого популяционного улучшения исходов [11].

Однако здесь следует обратить внимание на комплаентность пациентов. Как показывает вышеупомянутое исследование, в группе одноэтапного скрининга тест завершили 66 % женщин, тогда как в группе двухэтапного скрининга этот показатель достиг 92 % [7]. Это различие объясняется большей нагрузкой на пациентку при одноэтапном подходе: проведение ПГТТ требует предварительного голодания и занимает 2–3 часа, тогда как скрининговый тест с 50 г глюкозы проводится без ограничений в питании и занимает около часа. Только при положительном результате скринингового теста пациентке назначается полный ПГТТ.

Данные рассмотренного исследования [7] показывают, что более высокая частота выявления при одноэтапном скрининге сопровождается низкой приверженностью пациенток обследованию, а двухэтапный подход обеспечивает высокую комплаентность.

Наиболее важным с клинической точки зрения является вопрос о том, приводит ли более частая диагностика ГСД при одноэтапном скрининге к реальному снижению частоты неблагоприятных исходов. Данные рассматриваемого исследования T.A. Hillier и соавторов показывают, что частота рождения детей с массой, превышающей гестационный возраст, составила 8,9 % в группе одноэтапного скрининга и 9,2 % в группе двухэтапного (относительный риск 0,95; 97,5 % ДИ 0,87–1,05). Пренатальный комбинированный показатель, включавший мертворождение, неонатальную смерть, дистоцию плеча и родовые травмы, составил 3,1 % и 3,0 % соответственно (относительный риск 1,04; 97,5 % ДИ 0,88–1,23). Тогда как частота гестационной гипертензии или преэклампсии — 13,6 % и 13,5 % (относительный риск 1,00; 97,5 % ДИ 0,93–1,08), частота первичного кесарева сечения — 24,0 % и 24,6 % (относительный риск 0,98; 97,5 % ДИ 0,93–1,02) [7]. Данные показывают, что различия между группами по перинатальным и материнским исходам статистически незначимы.

Существующие расхождения в рекомендациях ведущих профессиональных организаций отражают разницу в приоритетах и ресурсных возможностях. В США ACOG продолжает рекомендовать двухэтапный скрининг [4], тогда как ADA — одноэтапный [5]. В России с 2025 года действуют клинические рекомендации, предписывающие проведение ПГТТ с 75 г глюкозы всем беременным на сроке 24–28 недель [2]. Российский подход, таким образом, тяготеет к одноэтапной стратегии, что соответствует рекомендациям Международной ассоциации диабета и беременности (IADPSG) [8]. Как отмечают Luo J., Tong L., Xu A., He Y., Huang H., Qiu D., Guo X., Chen H., Xu L., Li Y., Zhang H., Li Y., критерии IADPSG являются наиболее широко принятыми в мире, а одноэтапная диагностика ассоциирована с улучшенными исходами беременности и большей экономической эффективностью по сравнению с двухэтапным методом [9].

Вопрос экономической целесообразности каждого из методов остаётся открытым. С одной стороны, одно-

этапный скрининг выявляет больше случаев ГСД, что потенциально позволяет своевременно начать лечение и предотвратить осложнения. С другой стороны, он требует значительных затрат на проведение ПГТТ всем беременным. Двухэтапный скрининг, напротив, экономит ресурсы за счёт того, что полный ПГТТ проводится только женщинам с положительным скрининговым тестом (в данном исследовании — около 16,5 % от всех участниц). Однако двухэтапный подход может пропустить часть случаев ГСД, что также сопряжено с экономическими потерями из-за осложнений при отсутствии лечения. Как приходят к выводу Luo J., Tong L., Xu A., He Y., Huang H., Qiu D., Guo X., Chen H., Xu L., Li Y., Zhang H., Li Y., одноэтапный метод является более экономически эффективным, но этот вывод требует подтверждения в крупных рандомизированных контролируемых исследованиях [9].

В таблице 1 представим сравнение одноэтапного и двухэтапного методов скрининга ГСД.

Таблица 1.

Сравнение одноэтапного и двухэтапного методов скрининга ГСД

Показатель	Одноэтапный метод (ПГТТ 75 г)	Двухэтапный метод (скрининг 50 г + ПГТТ 100 г при положительном результате)
Частота выявления ГСД	16,5 %	8,5 %
Комплаентность (завершили тест)	66 %	92 %
Риск рождения крупного плода	8,9 %	9,2 %
Риск преэклампсии/гестационной гипертензии	13,6 %	13,5 %
Частота кесарева сечения	24,0 %	24,6 %
Комбинированный перинатальный исход	3,1 %	3,0 %
Экономическая эффективность	Выше (по данным IADPSG)	Ниже
Рекомендованные организации	ADA, IADPSG, Россия (с 2025 г.)	ACOG (США)

Источник: составлено автором на основе данных [7, 11]

В таблице 2 представим диагностические критерии ГСД при различных методах скрининга.

Данные показывают, что выбор метода скрининга ГСД представляет собой выбор между чувствительностью и специфичностью, между полнотой охвата и практической реализуемостью. Одноэтапный подход, несомненно, более чувствителен — он выявляет почти вдвое больше случаев ГСД. Однако это преимущество не сопровождается достоверным снижением частоты неблагоприятных исходов, что ставит под сомнение клиническую значимость «лишних» диагнозов. Представляется вероятным, что часть женщин, диагностированных только при одноэтапном скрининге, имеют столь мягкие нарушения углеводного обмена, что они не требуют активного вмешательства. С другой стороны, двухэтапный подход, при всей его практичности и лучшей комплаентности, может пропускать случаи ГСД, которые всё же требуют лечения.

Таблица 2.

Диагностические критерии ГСД при различных методах скрининга

Показатель	Одноэтапный метод (ПГТТ 75 г)	Двухэтапный метод (ПГТТ 100 г)
Гликемия натощак	≥5,1 ммоль/л (92 мг/дл)	≥5,3 ммоль/л (95 мг/дл)
Гликемия через 1 час	≥10,0 ммоль/л (180 мг/дл)	≥10,0 ммоль/л (180 мг/дл)
Гликемия через 2 часа	≥8,5 ммоль/л (153 мг/дл)	≥8,6 ммоль/л (155 мг/дл)
Гликемия через 3 часа	Не проводится	≥7,8 ммоль/л (140 мг/дл)
Количество необходимых патологических значений	Одно	Два и более

Источник: составлено автором на основе данных [6, 8, 10]

Российские исследователи Бунак И.В., Свиридова М.И., Старцева Н.М., Хамоева Ю.А. провели ретроспективный анализ 200 беременных с ГСД, установленным по одноэтапному протоколу. Они разделили пациенток на две группы: у первой диагноз был выставлен только по уровню глюкозы натощак (≥5,1 ммоль/л), у второй — только по значениям через 1 или 2 часа после нагрузки (при нормальной гликемии натощак). Оказалось, что женщины с гипергликемией натощак имели значительно более высокий исходный индекс массы тела (28,2 против 24,5 кг/м^2) и чаще нуждались в назначении инсулинотерапии, хотя различие не достигло статистической значимости (20,6 % против 11,3 %, p=0,07). Частота преэклампсии в этой группе была почти вдвое выше (37,3 % против 21,6 %, p=0,008), а вес новорождённых — достоверно больше (3498 г против 3317 г, p=0,004). Доля детей с макросомией (вес более 90-го перцентиля) составила 19,6 % против 8,2 % (p=0,02) [1]. Данные показывают, что даже в рамках одноэтапного скрининга беременные с изолированной гипергликемией натощак представляют собой группу более высокого риска неблагоприятных

исходов, что может требовать дифференцированного подхода к наблюдению и лечению.

В этой связи важным направлением дальнейших исследований является поиск клинических и лабораторных маркеров, позволяющих выделить среди беременных с положительным одноэтапным тестом тех, кто действительно нуждается в лечении. Кроме того, требуются крупные рандомизированные исследования, в которых сравнивались бы не только частота выявления, но и долгосрочные исходы для матерей и детей при различных стратегиях скрининга.

Выводы

Гестационный сахарный диабет остаётся одной из основных проблем современного акушерства, и его своевременная диагностика имеет решающее значение для профилактики осложнений. На сегодняшний день в мировой практике сложились два основных подхода к скринингу ГСД: одноэтапный с проведением ПГТТ с 75 г глюкозы всем беременным и двухэтапный с предварительным скрининговым тестом с 50 г глюкозы. Анализ проведенных исследований показал, что одноэтапный метод позволяет выявить ГСД почти в два раза чаще (16,5 % против 8,5 %), что потенциально даёт возможность своевременно начать лечение у большего числа пациенток. Однако этот метод связан с более низкой комплаентностью (66 % против 92 %) из-за необходимости предварительного голодания и длительности процедуры. При этом отмечено, что различия в частоте неблагоприятных исходов между группами статистически незначимы. Автор приходит к выводу, что выбор метода скрининга ГСД не может быть однозначным и должен определяться конкретными условиями работы медицинской организации, доступностью лабораторной базы, приоритетами клинициста и особенностями контингента беременных. В условиях хорошо организованной системы здравоохранения с высоким уровнем комплаентности пациенток предпочтительным может быть одноэтапный скрининг. При ограниченных ресурсах или низкой приверженности пациенток обследованию более оправданным представляется двухэтапный подход, который, сохраняя приемлемую чувствительность, обеспечивает значительно лучшую комплаентность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бунак, И.В., Свиридова М.И., Старцева Н.М., Хамоева Ю.А. Прогностическое значение показателей перорального глюкозотолерантного теста для течения и исходов беременности у пациенток с гестационным сахарным диабетом // Сахарный диабет. — 2024. — Т. 27, №6. — С. 565–571.
2. Клинические рекомендации «Гестационный сахарный диабет» (одобрены Минздравом России). — 2024. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_493702/ (дата обращения: 03.04.2026).
3. Лисицына, О.И. Пероральный глюкозотолерантный тест во время беременности: вопросы и ответы // Медицинский Совет. — 2024. — № 4. — С. 91–95.
4. ACOG Clinical Practice Update: Screening for Gestational and Pregestational Diabetes in Pregnancy and Postpartum // Obstetrics & Gynecology. — 2024. — №144(1). — pp. e20–e23.
5. American Diabetes Association Professional Practice Committee. 15. Management of Diabetes in Pregnancy: Standards of Care in Diabetes — 2024 // Diabetes Care. — 2024. — №47(1). — pp. S282–S294. DOI: 10.2337/dc24-S015.
6. Carpenter, M.W., Coustan D.R. Criteria for screening tests for gestational diabetes // American Journal of Obstetrics and Gynecology. — 1982. — №144(7). — pp. 768–773.
7. Hillier, T.A., Pedula K.L., Ogasawara K.K., Vesco K.K., Oshiro C.E.S., Lubarsky S.L., Van Marter J. A Pragmatic, Randomized Clinical Trial of Gestational Diabetes Screening // New England Journal of Medicine. — 2021. — Vol. 384. — №10. — pp. 895–904.
8. International Association of Diabetes and Pregnancy Study Groups Consensus Panel. International Association of Diabetes and Pregnancy Study Groups Recommendations on the Diagnosis and Classification of Hyperglycemia in Pregnancy. Diabetes Care. — 2010. — №33(3). — pp. 676–682.
9. Luo, J., Tong L., Xu A., He Y., Huang H., Qiu D., Guo X., Chen H., Xu L., Li Y., Zhang H., Li Y. Gestational Diabetes Mellitus: New Thinking on Diagnostic Criteria // Life (Basel). — 2024. — №14(12). — pp. 1665. doi: 10.3390/life14121665.
10. Luo, Q.-J., Ni Q. Life-course management of gestational diabetes mellitus: A narrative review // World J Clin Cases. — 2025. — №13(29). — pp. 111096. doi: 10.12998/wjcc.v13.i29.111096.
11. Sarker, M.R., Ramos G.A. Routine screening for gestational diabetes: a review // Current Opinion in Obstetrics and Gynecology. — 2024. — №36 (2). — pp. 97–103.

© Сизов Алексей Викторович (avsizov@inbox.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.26

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ ПРЕДРАСПОЛОЖЕННОСТИ К ГЕСТАЦИОННОМУ САХАРНОМУ ДИАБЕТУ

GENETIC MARKERS OF PREDISPOSITION TO GESTATIONAL DIABETES MELLITUS

A. Sizov

Summary. This article discusses the problem of genetic predisposition to gestational diabetes mellitus (GDM), one of the most common metabolic complications of pregnancy. The relevance of the topic is due to the steady increase in the incidence of GSD in the world and the lack of unified approaches to early detection of women from high-risk groups. Based on the analysis of data from Russian and foreign studies, including large meta-analyses and genome-wide association studies (GWAS), candidate genes associated with the development of GDM have been identified: TCF7L2, MTNR1B, CDKAL1, PPARG, KCNQ1, as well as the first described TBR1-SLC4A10 locus. It has been shown that the genetic architecture of GDM has both common features with type 2 diabetes mellitus and unique features associated with pregnancy. According to the results of the study, the author proposed a classification of genetic markers according to the mechanisms of their effect on carbohydrate metabolism: impaired beta-cell function, insulin resistance, regulation of circadian rhythms, as well as pregnancy-specific ones. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of using genetic markers for a personalized approach to the management of pregnant women. The prospects for further research are related to the study of genetic determinants in different ethnic groups, the development of more accessible methods of genotyping, as well as the study of epigenetic mechanisms that may explain the influence of environmental factors on the realization of genetic predisposition.

Keywords: gestational diabetes mellitus, genetic markers, TCF7L2, MTNR1B, CDKAL1, genome-wide association search, polygenic risk, pregnancy.

Сизов Алексей Викторович
кандидат медицинских наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный
педиатрический медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
avsizov@inbox.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается проблема генетической предрасположенности к гестационному сахарному диабету (ГСД) — одному из наиболее частых метаболических осложнений беременности. Актуальность темы обусловлена неуклонным ростом заболеваемости ГСД в мире и отсутствием единых подходов к раннему выявлению женщин из групп высокого риска. На основе анализа данных российских и зарубежных исследований, включая крупные мета-анализы и полногеномные исследования ассоциаций (GWAS), выявлены гены-кандидаты, ассоциированные с развитием ГСД: TCF7L2, MTNR1B, CDKAL1, PPARG, KCNQ1, а также впервые описанный локус TBR1-SLC4A10. Показано, что генетическая архитектура ГСД имеет как общие черты с сахарным диабетом 2 типа, так и уникальные особенности, связанные с беременностью. По результатам исследования была предложена авторская классификация генетических маркеров по механизмам их влияния на углеводный обмен: нарушение функции β-клеток, инсулинорезистентность, регуляция циркадных ритмов, а также специфические для беременности. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности использования генетических маркеров для персонализированного подхода к ведению беременных. Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением генетических детерминант в разных этнических группах, разработкой более доступных методов генотипирования, а также с исследованием эпигенетических механизмов, которые могут объяснять влияние факторов внешней среды на реализацию генетической предрасположенности.

Ключевые слова: гестационный сахарный диабет, генетические маркеры, TCF7L2, MTNR1B, CDKAL1, полногеномный поиск ассоциаций, полигенный риск, беременность.

Введение

Патогенетическое сходство ГСД с сахарным диабетом 2 типа даёт основание рассматривать ГСД как мультифакторное заболевание, в основе которого лежит сочетание генетической предрасположенности и воздействия внешних факторов. Однако данные относительно причастности аллельных вариантов к риску развития ГСД, полученные в разных популяциях, могут разниться, что связано как с объективными отличиями генофондов разных рас и этносов, так и с субъективными факторами, например критериями отбора групп наблюдения. В связи с этим особую ценность приобретают крупные мета-анализы и полногеномные исследования ассоциаций (GWAS), позволяющие выявлять наиболее значимые и воспроизводимые генетические маркеры. Цель настоящей статьи — систематизировать современные данные о генетических маркерах предрасположенности к ГСД, предложить классификацию выявленных локусов по патогенетическим механизмам.

Материалы и методы исследования

Материалами исследования послужили научные статьи российских и зарубежных ученых, представляющие результаты различных исследований в сфере генетики ГСД. В работе применены методы системного анализа, сравнительно-сопоставительный метод для выявления

межпопуляционных различий, методы описания, классификации, сопоставления, контент-анализа, табличный метод.

Результаты и обсуждение

Гестационный сахарный диабет представляет собой заболевание, характеризующееся гипергликемией, впервые выявленной во время беременности и не достигающей критериев манифестного сахарного диабета. Гестационный сахарный диабет связан с целым рядом неблагоприятных исходов. У женщин с ГСД повышен риск преэклампсии, преждевременных родов и последующего развития сахарного диабета 2 типа, а у рожденных ими детей чаще наблюдаются макросомия, неонатальная гипогликемия и ожирение в более старшем возрасте [2, 4, 8].

Гестационный сахарный диабет, по данным международной статистики, в мире встречается в 14 %, причём этот показатель неуклонно растёт из года в год [9]. Такая распространенность говорит о необходимости качественной диагностики, одним из методов которой является генетический анализ.

Для рассмотрения заявленной темы, прежде всего, необходимо рассмотреть семейную агрегацию и наследуемость ГСД. Как показано в работе российских исследователей, близкие родственники беременных женщин с ГСД в анамнезе составили 58,2 %, а у беременных с сахарным диабетом наследственный ГСД отмечался в 57,4 % случаев. Наличие у женщины родственников, страдающих сахарным диабетом 2 типа, существенно увеличивает риск ГСД. В частности, если диабет диагностирован у братьев или сестёр, риск ГСД возрастает в четыре раза [1]. Представленные данные подтверждают необходимость учёта семейного анамнеза при формировании групп риска и вместе с тем указывают на значимость поиска конкретных генетических маркеров.

В патофизиологии ГСД задействованы многие группы генов, причём генная сеть ГСД представляет собой ассоциации десятков генов, общих с таковыми при других типах диабета, преимущественно сахарном диабете 2 типа. Наиболее изученными и воспроизводимыми в разных популяциях являются полиморфизмы генов TCF7L2, MTNR1B, CDKAL1, PPARG и KCNQ1 [3, 5].

Ген TCF7L2 (транскрипционный фактор 7-подобный 2) традиционно рассматривается как один из главных генов предрасположенности к сахарному диабету 2 типа. Его белковый продукт участвует в Wnt-сигнальном пути, регулирующем пролиферацию и функцию β-клеток поджелудочной железы. В российском исследовании, проведённом под руководством Волковой Н.И. на базе РостГМУ, было показано, что генотип T/C полиморфного маркера rs7903146 гена TCF7L2 ассоциирован с повышенным риском развития ГСД с преобладающей инсулинорезистентностью (отношение шансов 2,53). Напротив, генотип T/T того же полиморфизма оказался связанным со снижением риска обоих подтипов ГСД (как с дисфункцией β-клеток, так и с инсулинорезистентностью) [11]. Авторы отмечают, что один и тот же полиморфизм может оказывать разнонаправленное действие в зависимости от генотипа, что подчёркивает важность тонкого генотипирования.

Что касается гена MTNR1B (рецептор мелатонина 1B), который представляет особый интерес в связи с ролью циркадных ритмов в регуляции углеводного обмена, многочисленные исследования G. Jia, Y. Gao, Ch. Li, Y. Zhang показали значимую ассоциацию трёх полиморфных вариантов MTNR1B — rs1387153, rs4753426 и rs10830963 — с повышенным риском ГСД. При этом наиболее выраженные эффекты наблюдались для rs10830963 (доминантная модель: отношение шансов 0,72, рецессивная модель: 1,56) [7]. В исследовании Wei L., Jiang Y., Gao P., Zhang J., Zhou X., Zhu Sh., Chen Y., Zhang H., Du Y. дополнительно было показано, что MTNR1B rs10830963 участвует в регуляции захвата глюкозы трофобластом через активацию PPARγ, что связывает генетическую предрасположенность с конкретными молекулярными механизмами на уровне фетоплацентарного комплекса [12].

Ген CDKAL1 (CDK5-регуляторный белок 1-подобный 1) кодирует белок, участвующий в процессинге тРНК и контроле секреции инсулина. Крупное исследование Gyan W.R., Zhang H., Shao T. типа «случай-контроль» в китайской популяции с последующим мета-анализом выявило, что полиморфизм rs7754840 гена CDKAL1 связан с повышенным риском ГСД (скорректированное отношение шансов 1,715; 95 % доверительный интервал 1,133–2,595). Примечательно, что другой полиморфизм этого же гена — rs7756992 — значимой ассоциации не показал, что указывает на специфичность эффекта для отдельных нуклеотидных вариантов. У носителей генотипа CC полиморфизма rs7754840 в возрасте до 30 лет наблюдались более высокие уровни глюкозы натощак и постпрандиальной глюкозы по сравнению с носителями генотипа GG [6].

Полногеномные исследования позволили не только подтвердить известные гены-кандидаты, но и выявить новые локусы, которые ранее не были связаны с нарушением углеводного обмена. Мета-анализ GWAS, выполненный Tam C.H., Wang Y., Wang C.C., Yuen L.Y., Lim C.K., Leng J., Wu L., Ng A.C., Hou Y., Tsoi K.Y., Wang H., Ozaki R. в китайской популяции с последующей репликацией в европейских и мультиэтнических когортах, позволил идентифицировать четыре локуса предрасположенности к ГСД. Наряду с уже известными MTNR1B, CDKAL1 и INS-IGF2-KCNQ1, ис-

Таблица 1.

Основные генетические маркеры предрасположенности к ГСД и их характеристики

Ген	Полиморфизм	Патогенетическая роль	Ассоциированный подтип ГСД	Отношение шансов (95% ДИ)	Популяция
TCF7L2	rs7903146 (T/T)	Защитный эффект	Снижение риска обоих подтипов	0,06 (0,003–1,18)	Россия
TCF7L2	rs7903146 (T/C)	Снижение секреции инсулина	С преимущественной ИР	2,53 (1,05–6,09)	Россия
MTNR1B	rs10830963	Нарушение суточной секреции инсулина	ГСД без дифференциации	1,56 (1,40–1,74)	Мета-анализ
CDKAL1	rs7754840 (CC)	Снижение секреции инсулина	ГСД (раннее начало)	1,715 (1,133–2,595)	Китай
TBR1-SLC4A10	rs117781972	Неизвестен (уникальный для ГСД)	ГСД	2,05 (1,61–2,62)	Китай

Примечание: ИР — инсулинорезистентность; ДИ — доверительный интервал.

Источник: составлено автором по данным [1, 6, 7, 10]

следователи обнаружили новый локус с полногеномной значимостью — TBR1-SLC4A10 (rs117781972), который ранее не был описан в GWAS по сахарному диабету 2 типа или гликемическим признакам. Этот локус связан с развитием ГСД с отношением шансов 2,05 (95 % доверительный интервал 1,61–2,62) [10]. Отметим, что данное открытие имеет принципиальное значение, поскольку указывает на то, что генетическая архитектура гликемических нарушений во время беременности может иметь свои уникальные черты, не сводимые к тем, которые наблюдаются вне беременности. На основе выявленных вариантов авторы построили полигенную шкалу риска (PRS). Женщины с высоким PRS (верхний квинтиль) имели более чем трёхкратное повышение риска ГСД и 71 % повышение риска нарушенной толерантности к глюкозе после беременности по сравнению с остальными участницами. Эти данные показывают, что интеграция генетической информации может существенно улучшить идентификацию беременных с высоким риском как ГСД, так и последующего диабета [10].

Для систематизации данных о наиболее значимых генетических маркерах, их патогенетической роли и величине ассоциации с ГСД в разных популяциях в таблице 1 представлены основные полиморфизмы, подтверждённые результатами крупных мета-анализов и полногеномных исследований.

На основе анализа литературных данных предлагается классификация генетических маркеров предрасположенности к ГСД, учитывающая их влияние на различные звенья патогенеза.

Первую группу составляют маркеры, ассоциированные с нарушением функции β-клеток поджелудочной железы. Сюда относятся варианты генов TCF7L2, CDKAL1 и KCNQ1. Носительство определённых генотипов этих генов приводит к снижению секреторного ответа β-клеток на глюкозную нагрузку, что особенно критично в условиях физиологической инсулинорезистентности беременности.

Таблица 2.

Классификация генетических маркеров ГСД по патогенетическим механизмам

Механизм действия	Гены	Влияние на углеводный обмен	Клинические особенности
Нарушение функции β-клеток	TCF7L2, CDKAL1, KCNQ1	Снижение секреторного ответа на глюкозу	Более раннее начало, необходимость инсулинотерапии
Инсулинорезистентность	PPARG, TCF7L2	Снижение чувствительности периферических тканей к инсулину	Ассоциация с ожирением, эффективность диетотерапии
Нарушение циркадных ритмов	MTNR1B	Нарушение суточной секреции инсулина	Ассоциация с нарушением сна, работой в ночные смены
Специфические для беременности	TBR1-SLC4A10	Требует уточнения	Уникальны для ГСД, не ассоциированы с СД2

Источник: составлено автором

Вторую группу образуют маркеры, связанные с регуляцией инсулинорезистентности периферических тканей. Наиболее ярким представителем этой группы является полиморфизм Pro12Ala гена PPARG. Этот вариант влияет на активность PPARγ — ключевого регулятора дифференцировки адипоцитов и чувствительности к инсулину.

Третью группу составляют маркеры, связанные с регуляцией циркадных ритмов и их влиянием на углеводный обмен, прежде всего варианты гена MTNR1B. Эти полиморфизмы нарушают нормальный суточный ритм секреции инсулина. Это в условиях беременности, когда регуляторные механизмы и без того напряжены, может стать фактором, провоцирующим гипергликемию.

Четвертую группу составляют специфические для беременности маркеры — TBR1-SLC4A10.

Выводы

Подводя итог проведённому анализу, можно сформулировать несколько положений, имеющих значение для дальнейшего развития исследований в области генетики ГСД и их клинического применения. На основе анализа данных российских и зарубежных исследований, включая крупные мета-анализы и полногеномные исследования ассоциаций (GWAS), выявлены ключевые гены-кандидаты, ассоциированные с развитием ГСД: TCF7L2, MTNR1B, CDKAL1, PPARG, KCNQ1, а также впервые описанный локус TBR1-SLC4A10. Показано, что генетическая архитектура ГСД имеет как общие черты с сахарным диабетом 2 типа, так и уникальные особенности, связанные с беременностью. По результатам исследования была предложена авторская классификация генетических маркеров по механизмам их влияния на углеводный обмен: нарушение функции β-клеток, инсулинорезистентность, регуляция циркадных ритмов, а также специфические для беременности. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности использования генетических маркеров для персонализированного подхода к ведению беременных. Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением генетических детерминант в разных этнических группах, разработкой более доступных методов генотипирования, а также с исследованием эпигенетических механизмов, которые могут объяснять влияние факторов внешней среды на реализацию генетической предрасположенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волкова, Н.И., Давиденко И.Ю., Воронина Е.В. Изучение взаимосвязи полиморфных маркеров rs7903146 гена TCF7L2, rs10830963 гена MTNR1B и rs1801282 гена PPARG (Pro12Ala) с различными подтипами гестационного сахарного диабета // Терапия. — 2025. — № 8. — С. 200–201.
2. Клинические рекомендации «Гестационный сахарный диабет» (одобрены Минздравом России). — 2024. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_493702/ (дата обращения: 03.04.2026).
3. Пакин, В.С. Молекулярно-генетические аспекты гестационного сахарного диабета // Проблемы эндокринологии. — 2017. — № 3. — С. 204–207. DOI: 10.14341/probl13345.
4. Пирматова, Д.А., Додхоева М.Ф., Пархофер К.Г. Особенности течения беременности и родов у женщин с гестационным сахарным диабетом // Медицинский вестник Национальной академии наук Таджикистана. — 2020. — Т. 10, № 2 (34). — С.163–167.
5. Фетисова, И.Н., Батрак Н.В. Генетические аспекты гестационного сахарного диабета // Вестник Ивановской государственной медицинской академии. — 2025. — № 3. — С. 50–59.
6. Gyan, W.R., Zhang H., Shao T. et al. Association of CDKAL1 gene polymorphisms variations with gestational diabetes mellitus risk in women: A case-control study and meta-analysis // BMC Endocrine Disorders. — 2025. — Vol. 25. — pp. 125. DOI: 10.1186/s12902-025-01874-8.
7. Jia, G., et al. Effects of MTNR1B Genetic Variants on Individual Susceptibility to Gestational Diabetes Mellitus: A Meta-Analysis / Y. Gao, Ch. Li, Y. Zhang // American Journal of Perinatology. 2020. — Vol. 37, № 6. — pp. 607–612. DOI: 10.1055/s-0039-1685446.
8. Luo, Q.-J., Ni Q. Life-course management of gestational diabetes mellitus: A narrative review // World J Clin Cases. — 2025. — №13(29). — pp. 111096. doi: 10.12998/wjcc.v13.i29.111096.
9. Luo, J., Tong L., Xu A., He Y., Huang H., Qiu D., Guo X., Chen H., Xu L., Li Y., Zhang H., Li Y. Gestational Diabetes Mellitus: New Thinking on Diagnostic Criteria // Life (Basel). — 2024. — №14(12). — pp. 1665. doi: 10.3390/life14121665.
10. Tam, C.H., Wang Y., Wang C.C., Yuen L.Y., Lim C.K., Leng J., Wu L., Ng A.C., Hou Y., Tsoi K.Y., Wang H., Ozaki R. et al. Identification and Potential Clinical Utility of Common Genetic Variants in Gestational Diabetes among Chinese Pregnant Women // Diabetes & Metabolism Journal. — 2025. — №49(1). — pp. 128–143. DOI: 10.4093/dmj.2024.0139.
11. Volkova, N., Davidenko I. Relationship between polymorphic markers rs7903146 variant of TCF7L2 gene, rs10830963 variant of MTNR1B gene and rs1801282 variant of PPARG (Pro12Ala) gene and various subtypes of gestational diabetes mellitus // Endocrine Abstracts. — 2025. — Vol. 110. — EP328. DOI: 10.1530/endoabs.110.EP328.
12. Wei, L., Jiang Y., Gao P., Zhang J., Zhou X., Zhu Sh., Chen Y., Zhang H., Du Y. Role of melatonin receptor 1B gene polymorphism and its effect on the regulation of glucose transport in gestational diabetes mellitus // Journal of Zhejiang university-science B. — 2023. — №24(1). — pp. 78–88.

© Сизов Алексей Викторович (avsizov@inbox.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2026.04-2.30

ПАТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ РАЗВИТИЯ ИШЕМИЧЕСКОГО ИНСУЛЬТА И ПОДХОДЫ К ПЕРВИЧНОЙ И ВТОРИЧНОЙ ПРОФИЛАКТИКЕ

PATHOGENETIC MECHANISMS OF ISCHEMIC STROKE AND APPROACHES TO PRIMARY AND SECONDARY PREVENTION

S. Tyryshkin

Summary. The article addresses the issues related to the pathogenesis of ischemic stroke and modern approaches to its primary and secondary prevention. An analysis of known risk factors such as atrial fibrillation, arterial hypertension, diabetes mellitus, and obesity is provided, highlighting their direct impact on the risk of developing an ischemic stroke. The study presents original data obtained from analyzing clinical characteristics of patients with a high risk of stroke development. Insufficient current approaches to managing these risks are emphasized, along with suggestions for enhancing preventive measures and introducing innovative methods like remote patient monitoring systems.

Keywords: ischemic stroke, risk factors, prevention, arterial hypertension, atrial fibrillation, diabetes mellitus, obesity, telemedicine monitoring.

Тырышкин Сергей Юрьевич
к.т.н., доцент, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул
service.vip-spe@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена вопросам патогенеза ишемического инсульта и современным подходам к его первичной и вторичной профилактике. Приведен анализ известных факторов риска, таких как фибрилляция предсердий, артериальная гипертензия, сахарный диабет и ожирение, показано их непосредственное влияние на риск возникновения ишемического инсульта. Представлены собственные данные, полученные при изучении динамики клинических характеристик пациентов с высоким риском развития инсульта. Подчеркивается недостаточность текущих подходов к управлению факторами риска и необходимость усиления профилактических мер, а также внедрение инновационных методов, таких как дистанционные системы мониторинга состояния пациентов. Высказаны предложения по повышению эффективности диспансерного наблюдения и профилактике ишемического инсульта.

Ключевые слова: ишемический инсульт, факторы риска, профилактика, артериальная гипертензия, фибрилляция предсердий, сахарный диабет, ожирение, дистанционное наблюдение.

Введение

Ишемический инсульт представляет собой тяжёлое сердечно-сосудистое осложнение, проявляющееся острым развитием гипоперфузии головного мозга вследствие обструкции артерий каротидного или вертебро-базилярного бассейнов [1,2]. Заболеваемость и инвалидизация, вызванные ишемическими инсультами, стали одной из важнейших социальных проблем современности, поскольку затрагивают преимущественно лиц трудоспособного возраста [3,4].

Развитие данного осложнения связано с образованием тромба либо эмбола, поступающего из другого отдела сердечно-сосудистой системы. Основные причины включают атеросклероз сосудов, нарушения ритма сердца (особенно фибрилляцию предсердий), артериальную гипертензию, сахарный диабет и другие факторы риска [5,6].

Несмотря на успехи в диагностике и лечении, сохраняется необходимость повышения эффективности мероприятий по первичной и вторичной профилактике ишемического инсульта, особенно среди пациентов с множественными факторами риска [7,8].

Объект исследования

В данной работе исследуется проблема ишемического инсульта головного мозга и методы её профилактики.

Предмет исследования

Изучаются возможные пути улучшения консервативной коррекции модифицируемых факторов риска ишемического инсульта.

Цель исследования

Выявление значимых предикторов, влияющих на риск первичных и повторных ишемических инсультов у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями.

Методы исследования

Использовался метод анализа публикаций по актуальным отечественным и зарубежным источникам, посвящённым изучению патофизиологии ишемического инсульта и возможных способов его предупреждения. Дополнительно проведено ретроспективное изуче-

ние истории болезни и амбулаторных карт пациентов, страдающих сердечно-сосудистыми заболеваниями, находящихся на диспансерном учёте в поликлинике. Для оценки влияния факторов риска применялись статистические критерии, рассчитывались относительные и абсолютные риски [9].

Результаты исследования

Исследование проводилось на выборке из 100 пациентов с установленным диагнозом ишемического инсульта. Среди участников преобладали лица пожилого возраста (65±12,5лет), большинство страдали хроническими заболеваниями, такими как артериальная гипертония, сахарный диабет, избыточная масса тела и курением [10,11].

Критерии включения: наличие гипертонической болезни третьей стадии, высокие риски инсульта по шкале CHA2DS2-VASC.

Период наблюдения составил пять лет. В течение этого периода регистрировались такие неврологические осложнения как ишемический инсульт и транзиторная ишемическая атака. В течение этого времени все пациенты находились на амбулаторном контроле невролога и кардиолога. Всем пациентам были разъяснены основные аспекты их консервативного ведения, заключающегося в контроле уровне артериального давления, уровня глюкозы, уровня общего холестерина, необходимости в лечении фибрилляции предсердий и других нарушений ритма сердца.

Анамнестические клинические данные, среди которых было:

- Степень стеноза брахиоцефальных сосудов
- Средний уровень артериального давления
- Уровень холестерина
- Уровень глюкозы

Основные клинические характеристики изучаемой группы приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Клинические характеристики изучаемой когорты пациентов

Параметр	Значение
Общее количество пациентов	100 (100 %)
Мужчины	48 (48 %)
Женщины	52 (52 %)
Возраст, средний (M±σ)	65 ± 12,5 лет
Систолическое АД, среднее (M±σ)	162 ± 14 мм рт. ст.
Диастолическое АД, среднее (M±σ)	94 ± 8 мм рт. ст.
Уровень глюкозы, средний (M±σ)	6,4 ± 1,8 ммоль/л
Уровень общего холестерина, средний (M±σ)	6,2 ± 1,1 ммоль/л
Фибрилляция предсердий (все формы)	62 (62 %)
• Пароксизмальная форма	28 (28 %)
• Персистирующая форма	20 (20 %)
• Постоянная форма	14 (14 %)
Сахарный диабет 2 типа	38 (38 %)
Ожирение (ИМТ ≥30)	41 (41 %)
Избыточная масса тела (ИМТ 25–29,9)	35 (35 %)
Курение (активное)	33 (33 %)
CHA_2DS_2-VASc, средний балл (M±σ)	4,2 ± 1,6
• 2–3 балла (умеренный риск)	28 (28 %)
• 4–5 баллов (высокий риск)	45 (45 %)
• 6 и более (очень высокий риск)	27 (27 %)
Всего цереброваскулярных событий	27 (27 %)
• Ишемический инсульт	18 (18 %)
• Транзиторная ишемическая атака (ТИА)	9 (9 %)
Летальность от инсульта	4 (4 %)
Достигли целевого АД (<140/90)	43 (43 %)
Достигли целевой глюкозы (<6,1 ммоль/л)	51 (51 %)
Достигли целевого холестерина (<5,0 ммоль/л)	32 (32 %)

Анализируя частоту встречаемости ишемических инсультов, выявлено, что ведущими факторами риска являются:

- постоянная форма фибрилляции предсердий,
- сахарный диабет,
- возраст старше 70 лет,
- ожирение.

Отмечено значительное превышение рисков при сочетании нескольких факторов риска одновременно (рисунки 1–3).

- Постоянная форма фибрилляции предсердий увеличивает риск почти в 5 раз (RR = 4,8),
- Сахарный диабет утраивает риск (RR = 3,2),
- Возраст >70 лет имеет умеренное влияние (RR = 2,5),
- Ожирение усиливает риск на 90 % (RR = 1,9).

Кроме того, обнаружено, что частота инсультов возрастает пропорционально количеству присутствующих факторов риска (рисунок 2).

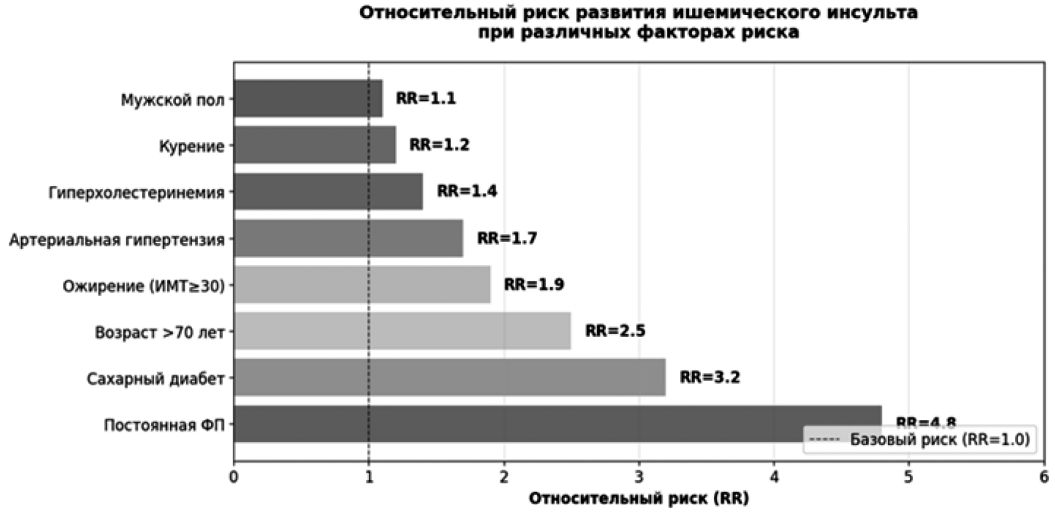


Рис. 1. Относительный риск развития ишемического инсульта при различных факторах риска

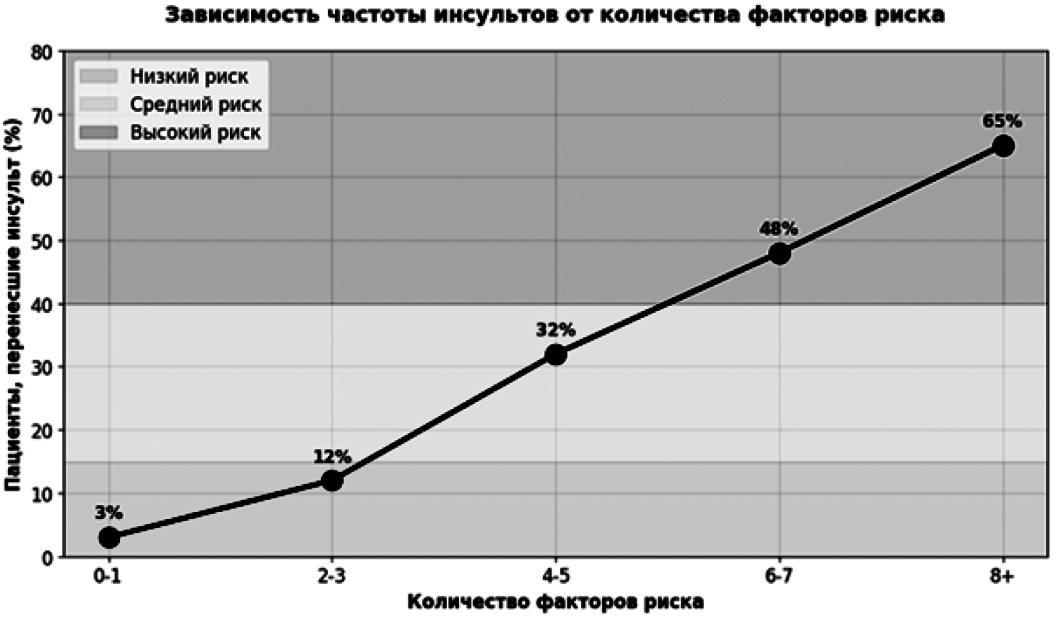


Рис. 2. Зависимость частоты инсульта от количества факторов риска

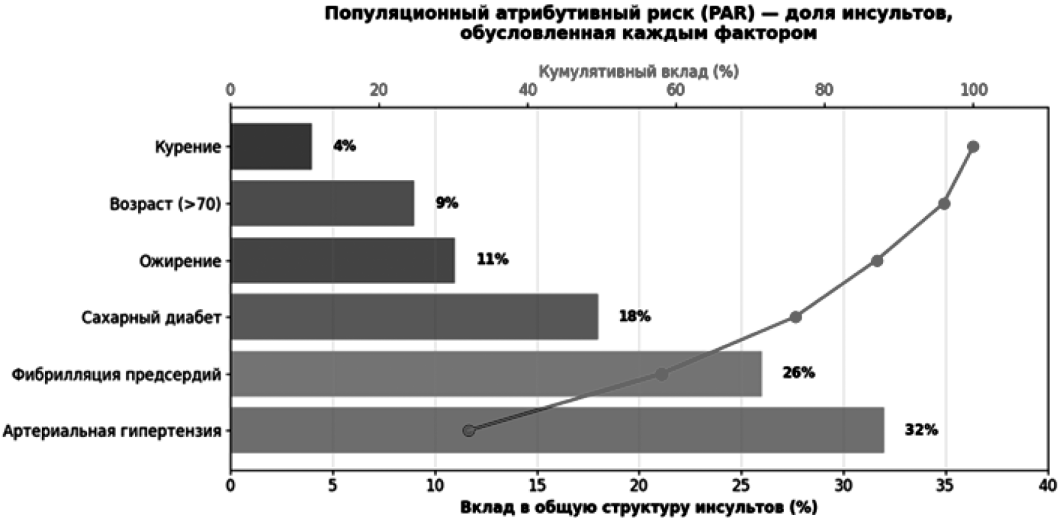


Рис. 3. Популяционный атрибутивный риск (PAR) — доля инсультов, обусловленная каждым фактором

Особенно выделяется пороговое значение риска при наличии четырёх и более факторов, превышающее 30 %.

Также вычислен вклад отдельных факторов риска в общую заболеваемость инсультом (рисунок 3).

Наиболее существенный вклад вносят:
- артериальная гипертензия (32 %),
- фибрилляция предсердий (26 %),
- сахарный диабет (18 %).

Результаты показывают важность комплексных подходов к профилактике ишемического инсульта, включая воздействие на ключевые модифицируемые факторы риска [12,13].

Обсуждение

Полученные данные подтверждают высокую значимость артериальной гипертензии, сахарного диабета и фибрилляции предсердий как ведущих факторов риска ишемического инсульта. Важно подчеркнуть роль систематического диспансерного наблюдения и регулярных обследований пациентов с высоким уровнем риска [14, 15].

Эффективность текущей практики управления факторами риска оказалась недостаточной. Только 43 % пациентов достигли целевого значения артериального давления (<140/90 мм рт. ст.), а достижение целевых значений холестерина составило менее трети пациентов (32 %). Эти результаты указывают на значительные резервы для улучшения профилактической работы [16, 17].

Возможности дистанционной телемедицины демонстрируют потенциал повышения информативности врачебных консультаций и увеличения доли пациентов, достигающих целевых уровней факторов риска [18, 19].

Заключение

Наше исследование подтвердило ведущую роль постоянных форм фибрилляции предсердий, повышенного артериального давления, диабета и ожирения в формировании риска ишемического инсульта. Полученные результаты подчёркивают потребность в усилении первичной и вторичной профилактики ишемического инсульта посредством комплексного воздействия на факторы риска и внедрения современных информационных технологий в систему здравоохранения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федин, А.И. Обзор клинических рекомендаций лечения и профилактики ишемического инсульта / А.И. Федин, К.Р. Бадалян // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. — 2019. — Т. 119, № 8-2. — С. 95–100. — DOI 10.17116/jnevro201911908295. — EDN UIDYQS.
2. Клиническая картина ишемического инсульта на фоне распространения нейротропных вирусных инфекций / А.С. Мокеев, О.О. Самохина, В.С. Косолапова [и др.] // Молодежь, наука, медицина: тезисы 69-й Всероссийской межвузовской студенческой научной конференции с международным участием, Тверь, 20–21 апреля 2023 года. — Тверь: Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Тверская государственная медицинская академия Министерства здравоохранения Российской Федерации, 2023. — С. 306–307. — EDN TGHJDA.
3. Клочихина, О.А. Динамика распространённости основных патогенетических типов инсульта в России, по данным территориально-популяционного регистра, 2009-2013 гг / О.А. Клочихина, Л.В. Стаховская // Сборник тезисов юбилейной Всероссийской научно-практической конференции (к 70-летию Российского кардиологического научно-производственного комплекса, 55 ежегодная сессия), Москва, 01–02 июня 2015 года. — Москва: ООО «ИнтерМедсервис», 2015. — С. 68. — EDN WKJJLD.
4. Шутеева, Е.Ю. Церебролизин в коррекции когнитивных нарушений у пациентов с хронической ишемией мозга / Е.Ю. Шутеева // Региональный вестник. — 2020. — № 6(45). — С. 26–28. — EDN CYHNNT.
5. Ягудина, Р. И. Развитие фармакоэкономики и фармакоэпидемиологии в России / Р. И. Ягудина // Вестник Росздравнадзора. — 2009. — № 2. — С. 64–67. — EDN IYFPOO.
6. Неврычева, Е.В. Кардиоваскулярная профилактика. Часть I (лекция для средних медицинских работников) / Е.В. Неврычева // Здравоохранение Дальнего Востока. — 2019. — № 3(81). — С. 61–75. — DOI 10.33454/1728-1261-2019-3-61-75. — EDN NNPOTX.
7. Данилов, А.Б. Возможности применения тизанидина (Сирдалуда) в клинической практике. Обзор литературы / А.Б. Данилов // РМЖ. — 2009. — Т. 17, № 20. — С. 1370–1375. — EDN PCZAMF.
8. Ципралекс (эсциталопрам) при лечении тяжёлых эндогенных депрессий: особенности терапевтической эффективности и переносимости / Л.И. Абрамова, И.В. Олейчик, Н.Н. Иванец [и др.] // Психиатрия и психофармакотерапия. — 2007. — Т. 9, № 2. — С. 48–53. — EDN RDHUJD.
9. Парфенов, В.А. Факторы риска, течение и вторичная профилактика при патогенетических подтипах ишемического инсульта / В.А. Парфенов, М. М. Воронцов, С. Е. Хатькова // Неврологический журнал. — 2010. — Т. 15, № 6. — С. 11–15. — EDN NBKXZR.
10. Батышева, Т.Т. Современные технологии диагностики и реабилитации в неврологии и ортопедии / Т.Т. Батышева; Т.Т. Батышева, Д.В. Скворцов, А.И. Труханов; под общ. ред. Скворцова Д.В. — Москва: Медика, 2005. — 244 с. — (Библиотека восстановительной медицины). — ISBN 5-98495-002-4. — EDN QLKKBL.
11. Неврология: клиника, диагностика / Н.И. Ананьева, Ю.В. Коцюбинская, В.А. Михайлов [и др.]. — Санкт-Петербург: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство «СпецЛит», 2022. — 174 с. — ISBN 978-5-299-01145-6. — EDN ISNKYZ.
12. Макарова, Л.М. Фармакологическая коррекция метаболических нарушений при острой ишемии головного мозга / Л.М. Макарова. — 106: Общество с ограниченной ответственностью «Бук», 2022. — 106 с. — ISBN 978-5-907665-29-3. — EDN HCPJEU.

13. Гунченко, А.С. Факторы риска острой и хронической ишемии головного мозга (клинико-генетический анализ): специальность 14.01.11 «Нервные болезни»: диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук / Гунченко Анастасия Сергеевна, 2019. — 123 с. — EDN DHVPRJ.
14. Чугунова, С.А. Комплексный клинический, эпидемиологический и генетический анализ геморрагического инсульта в различных этнических группах: диссертация на соискание ученой степени доктора медицинских наук / Чугунова САРГЫЛАНА АФАНАСЬЕВНА. — Якутск, 2024. — 403 с. — EDN NDPQOH.
15. Общие принципы проведения фармакоэкономических исследований в неврологии: Метод. рекомендации № 32/33 / Правительство Москвы. Департамент здравоохранения; [Сост.: Е.И. Гусев и др.]. — Москва: Разумова, 2003. — 54 с. — ISBN 5-93513-034-3. — EDN QLFESP.
16. Ланская, О.В. Синаптическая и нейрональная пластичность при различных функциональных состояниях нервной системы / О.В. Ланская // NovaInfo.Ru. — 2016. — Т. 2, № 57. — С. 35–52. — EDN XETGPR.
17. Дамулин, И.В. Постинсультные двигательные расстройства / И. В. Дамулин // Consilium Medicum. — 2003. — Т. 5, № 2. — С. 64–69. — EDN UBZYQN.
18. Кобалава, Ж.Д. Современные европейские рекомендации по артериальной гипертонии: обновлённые позиции и нерешённые вопросы / Ж.Д. Кобалава, Э.Л. Колесник, Е.А. Троицкая // Клиническая фармакология и терапия. — 2019. — Т. 28, № 2. — С. 7–18. — EDN FFYBVR.
19. Основы ранней реабилитации больных с острыми нарушениями мозгового кровообращения. Методические рекомендации / В. И. Скворцова, В.М. Шкловский, Б.А. Поляев [и др.] // ЛФК и массаж. Лечебная физическая культура и массаж. — 2006. — № 11(35). — С. 3–13. — EDN HYNGCR.

© Тырышкин Сергей Юрьевич (service.vip-spe@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

Наши авторы

Abadzhyan A. — Financial University under the Government of the Russian Federation

Amirov R. — Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI), Samara

Andrikov D. — Candidate of Technical Science, associate professor, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumb

Anishchenko E. — Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky

Anishchenko L. — Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky

Avramenko M. — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky

Bakhtarova Kh. — Physician of Federal Public Health Institution «Medical and Sanitary Unit of the Ministry of Internal Affairs of Russia for the Chechen Republic»(Grozny, Russia)

Bazhin V. — Doctor of Engineering, Professor, Saint Petersburg Mining University of Empress Catherine II

Bednyak S. — Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volga State University of Telecommunications and Informatics»

Bersanov R. — Doctor of Medical Sciences, Chief Researcher, Integrated Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Grozny, Russia)

Borzdyko E. — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky

Budaichiev G. — PhD, Associate Professor, Dagestan State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, Makhachkala

Bui Thi Lan An — PhD (Biology), Researcher, Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Center, Hanoi, Vietnam

Chavtaraev M. — Chief Physician of GBU RD «Dental Clinic No. 1»

Chekanov I. — Postgraduate Student, Senior Lecturer, Russian State Social University, Moscow, Russia

Our authors

Chigray O. — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky

Chirskov P. — Researcher, Volgograd Plague Control Research Institute of Rospotrebnadzor, Volgograd, Russia

Dadaeva E. — Assistant, Chechen State University (Grozny, Russia)

Dadayev A. — Doctor of Medical Sciences, Leading Researcher, Integrated Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Grozny, Russia)

Dalgatova A. — Associate Professor, Dagestan State Medical University Ministry of Health of Russia

Davidyan L. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Ulyanovsk State University, Ulyanovsk

Demikhov V. — Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky

Dolganova M. — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky

Dzanbulatov M. — PhD, Associate Professor, Dagestan State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, Makhachkala

Egorov A. — Doctor of Medical Sciences, Professor, N.V. Sklifosovsky Institute of Clinical Medicine; Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Moscow, Russian Federation

Eliseev S. — PhD student, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko

Fedorova F. — Dagestan State Medical University Ministry of Health of Russia

Fedorova N. — Dagestan State Medical University Ministry of Health of Russia

Fedorova O. — Doctor of Biological Sciences, K.I. Skryabin Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology

Ganshin A. — postgraduate student, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumb

Guley Yu. — postgraduate student, Ulyanovsk State University, Ulyanovsk

Kal'mens V. — MD, PhD, Neurosurgeon, N.P. Bekhtereva Institute of the Human Brain, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

Kholyavin A. — Doctor of Medical Sciences, Neurosurgeon, N.P. Bekhtereva Institute of the Human Brain, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

Koksharova T. — Clinical Resident, Russian Research Neurosurgical Institute named after Professor A.L. Polenov (branch of the Federal State Budgetary Institution V.A. Almazov National Medical Research Center of the Ministry of Health of the Russian Federation), St. Petersburg, Russian Federation

Kolybanov K. — Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Russian State University for the Humanities, Moscow, Russia

Konyashkin N. — Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI), Samara

Korotkikh I. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Honored Doctor of the Russian Federation, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko» of the Ministry of Health of the Russian Federation

Krivov A. — Moscow Polytechnic University (Moscow)

Kurbanova E. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Dagestan State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, Makhachkala

Kuznetsov A. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Russian State Social University, Moscow, Russia

Larina E. — Doctor of Biological Sciences, K.I. Skryabin Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology

Madaeva M. — Teacher, Chechen State University (Grozny, Russia)

Magomedova U. — Senior Lecturer, Dagestan State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, Makhachkala

Malakhov S. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI), Samara

Mamontova L. — Postgraduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko» of the Ministry of Health of the Russian Federation

Martynenko A. — Moscow Polytechnic University (Moscow)

Mezhivgadzhieva A. — Dagestan State Medical University Ministry of Health of Russia

Nesterenko A. — Senior Lecturer, Pacific National University (Khabarovsk)

Nesterenko V. — Postgraduate student, Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky

Nikitina L. — PhD, Associate Professor, St. Petersburg Mining University of Empress CatherineII

Orlova E. — Candidate of Agricultural Sciences, K.I. Skryabin Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology

Pivneva S. — Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Russian State Social University, Moscow, Russia

Prikhodko A. — Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow Polytechnic University"

Prikhodko D. — Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow Polytechnic University"

Russkova K. — Candidate of Medical Sciences, Assistant, N.V. Sklifosovsky Institute of Clinical Medicine; Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Moscow, Russian Federation

Samsonov D. — Neurologist, N.P. Bekhtereva Institute of the Human Brain, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

Shapsigov A. — Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov

Shishkin A. — Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volga State University of Telecommunications and Informatics»

Sidorova Yu. — postgraduate student, Ulyanovsk State University, Ulyanovsk

Sizov A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University Ministry of Health of the Russian Federation

Struchkova A. — Ph.D., Associate Professor, JSC «Yakutia Airlines», Yakutsk

Suvorov S. — Candidate of Economic Sciences, Moscow Polytechnic University (Moscow)

Tchipungo Eduardo Afonso — Postgraduate Student (PhD Student), National University of Science and Technology «MISIS»

Tishkov I. — Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI), Samara

Tran Duc Hieu — Graduate student, Saint Petersburg Mining University of Empress Catherine II

Tselih E. — Doctor of Biological Sciences, Professor, Far Eastern State Transport University (Khabarovsk)

Tyryshkin S. — Ph.D. in Engineering Sciences, Associate Professor, Altay State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russian Federation

Vasilyeva T. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Moscow Technical University of Communications and Informatics

Vetshev F. — Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, N.V. Sklifosovsky Institute of Clinical Medicine; Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Moscow, Russian Federation

Yihan Yang — Postgraduate Student, N.V. Sklifosovsky Institute of Clinical Medicine; Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Moscow, Russian Federation

Zakaryukin M. — Postgraduate Student, Moscow University of Finance and Law «MFUA»

Zakharova I. — D.Sc. (Biology), Associate Professor, Leading Researcher, Volgograd Plague Control Research Institute of Rospotrebnadzor, Volgograd, Russia

Zakirova A. — Moscow Institute of Physics and Technology

Zemskova L. — Postgraduate student, Bryansk State University named after Academician I.G. Petrovsky

Zhangeriev A. — Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov

Zhangeriev S. — Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov

Zhemerikin G. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, N.V. Sklifosovsky Institute of Clinical Medicine; Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Moscow, Russian Federation

Zholondiyevsky E. — Lecturer, PEI HE «Togliatti management academy», Togliatti

Zubarev I. — Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI), Samara

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).