

ISSN 2223-2966



СОВРЕМЕННАЯ НАУКА:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 8 2025 (АВГУСТ)

Учредитель журнала
Общество с ограниченной ответственностью
«НАУЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал издается с 2011 года.

Редакция:

Главный редактор
А.В. Царегородцев
Выпускающий редактор
Ю.Б. Миндлин
Верстка
М.А. Комарова

Подписной индекс издания
в каталоге агентства «Пресса России» — 80016
В течение года можно произвести подписку
на журнал непосредственно в редакции.

Издатель:

Общество с ограниченной ответственностью
«Научные технологии»

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

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

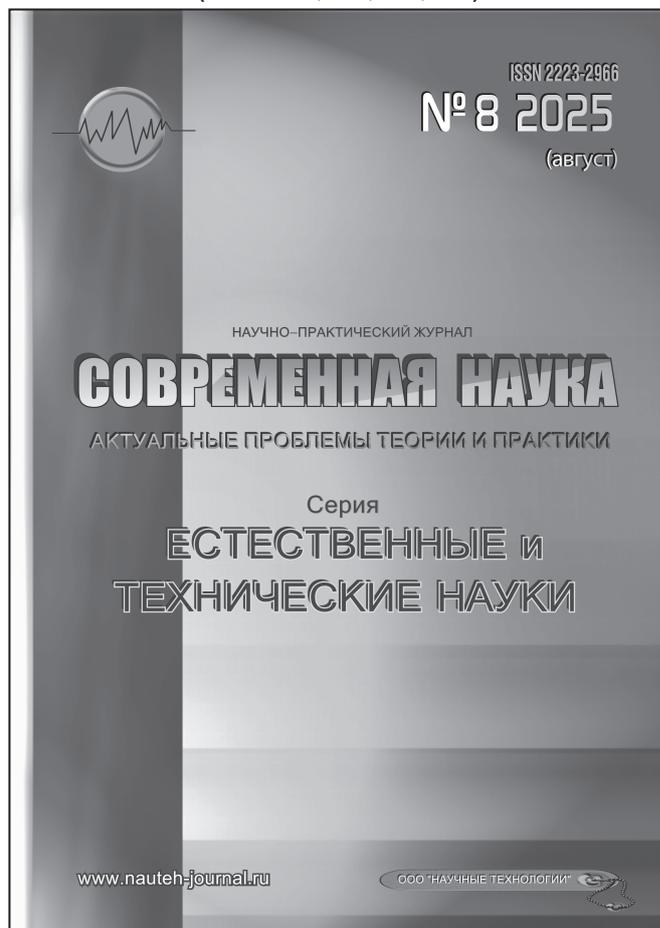
Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия.

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

Научно-практический журнал

Scientific and practical journal

(ВАК — 1.1.2, 1.5.x, 2.3.x, 3.1.x)



В НОМЕРЕ:

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

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

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

Журнал отпечатан в типографии
ООО «КОПИ-ПРИНТ» тел./факс: (495) 973-8296
Подписано в печать 17.08.2025 г. Формат 84x108 1/16
Печать цифровая Заказ № 0000 Тираж 2000 экз.

ISSN 2223-2966



Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Общая биология

Беднов П.В., Вешнева Н.В. — Особенности экологического мониторинга твердых промышленных отходов в КНР
Bednov P., Veshneva N. — On the main indicators of environmental monitoring of wastewater and atmosphere in China7

Бугеро Н.В., Александрова С.М., Титова А.А., Якимова Д.В., Павлова Е.В. — Современные возможности клинической биохимии в лабораторной диагностике острого и хронического панкреатита
Bugero N., Aleksandrova S., Titova A., Yakimova D., Pavlova E. — Modern clinical biochemistry possibilities in laboratory diagnostics of acute and chronic pancreatitis12

Грибанова Е.А. — Каротиноиды психротолерантных дрожжей восточной антарктиды. Влияние температуры на состав и спектральные свойства пигментов
Gribanova E. — Carotenoids of psychrotolerant yeast yeasts antarctica. influence of temperature on the composition and spectral properties of pigments19

Растанина Н.К., Галанина И.А., Перфильев А.В. — Снижение экологической нагрузки от кислых дренажных вод с использованием проницаемых реакционных барьеров
Rastanina N., Galanina I., Perfiliev A. — Reducing the environmental impact of acid mine drainage using permeable reactive barriers27

Информатика, вычислительная техника и управление

Адаев Р.Б., Севостьянов П.А. — Алгоритмы расчёта максимального потока для изделий из тканых материалов
Adaev R., Sevostyanov P. — Algorithms for calculating the maximum flow for woven products34

Бексаев Н.С. — От атомарного доверия к распределенному консенсусу: сравнительный анализ архитектур доверенной третьей стороны на блокчейн-платформе ethereum
Beksaev N. — From atomic trust to distributed consensus: a comparative analysis of trusted third-party architectures on the Ethereum blockchain platform42

Везубова Н.А., Сакович Н.Е., Чекулаев А.А. — Сравнение скорости сходимости градиентного и стохастического градиентного спусков при обучении полносвязных нейронных сетей
Vezubova N., Sakovich N., Chekulaev A. — Comparison of the convergence rate of gradient and stochastic gradient descent in training fully connected neural networks48

Дементьева Е.М. — Интеграция данных в хранилище из разноформатных систем-источников: методы и практики
Dementieva E. — Integration of data into storage from multi-format source systems: methods and practices53

Калистратов Д.С., Митрофанов Д.Г. — Особенности определения отношения сигнал-шум в системах радиосвязи с цифровой модуляцией сигнала по методу комплексной огибающей
Kalistratov D., Mitrofanov D. — Features of determining the signal-to-noise ratio in radio communication systems with digital signal modulation by the complex envelope method58

Ким Р.И., Варламов О.О., Афанасьев Г.И. — Автоматизация решения оптимизационных задач с использованием гибридной интеллектуальной системы на основе больших языковых моделей и миварных сетей
Kim R., Varlamov O., Afanasyev G. — Automation of solving optimization problems using a hybrid intelligent system based on large language models and mivar networks64

- Колосовский Е.В., Катаева Л.Ю.** — Численное моделирование волны цунами, возникающей при падении льдины на водную поверхность, с учётом реального профиля морского дна
Kolosovskiy E., Kataeva L. — Numerical simulation of a tsunami wave generated by an ice block impact with realistic seabed topography72
- Малявин М.Ю.** — Методы обеспечения информационной безопасности в контексте разработки веб-платформы для проведения научных конференций
Malyavin M. — Information security methods in the context of developing a web platform for scientific conferences77
- Новиков К.С.** — Физически обоснованные нейросетевые подходы в задачах эколого-статистического прогнозирования
Novikov K. — Physically based neural network approaches to the problems of ecological-statistical forecasting83
- Объедков В.В.** — Модель функционирования интеллектуальных сетей электроснабжения для контроля их структурной устойчивости по методу Монте-Карло
Obedkov V. — Model of functioning of smart power supply grid for control of their structural stability by the Monte Carlo method.88
- Павлюк Д.А., Яковлев И.В.** — Разработка многофункционального telegram-бота как единого шлюза к разнообразным нейросетям
Pavlyuk D., Yakovlev I. — Development of a multifunctional telegram bot as a unified gateway to diverse neural networks96
- Парамонов М.Ю.** — Автоматизированная система комплексной оценки технического состояния объектов капитального строительства на основе цифровых технологий
Paramonov M. — Automated system for comprehensive assessment of the technical condition of capital construction facilities based on digital technologies 103
- Плотников А.С.** — Автоматизированная оценка качества измерений радионавигационных параметров на основе метода анализа индекса мерцаний
Plotnikov A. — Automated quality assessment of radio navigation parameter measurements based on the flicker index analysis method 112
- Ромашкова О.Н., Ермакова Т.Н.** — Модели процессов управления и учета для залоговой коммерческой организации
Romashkova O., Ermakova T. — Models of management and accounting processes for a pawnshop commercial organization 117
- Силантьев Д.М.** — Современные методы математического моделирования в наноматериаловедении
Silantev D. — Modern methods of mathematical modeling in nanomaterials science 126
- Силантьев Д.М.** — Современные методы математического моделирования в технологиях лазерной обработки материалов
Silantev D. — Modern methods of mathematical modeling in laser material processing technologies 131
- Солобута А.В., Павлов В.А.** — Применение градиентного бустинга для прогнозирования стоимости ценных бумаг
Solobuto A., Pavlov V. — Application of gradient boosting for stock price prediction 137
- Солобута А.В., Павлов В.А.** — Применение нейронных сетей для прогнозирования стоимости ценных бумаг
Solobuto A., Pavlov V. — Application of neural networks for predicting the value of securities.... 143
- Фигуров М.О., Мищук Б.Р.** — Применение адаптивного RL-агента для динамического регулирования экономических потоков в ММО-симуляции
Figurov M., Mishchuk B. — The use of an adaptive RL agent for dynamic regulation of economic flows in an MMO simulation 146

Клиническая медицина

- Гильфанова Р.А., Афанасьева З.А.** — Влияние анестезии и коморбидной патологии на послеоперационное течение пациентов с колоректальным раком

Gilfanova R., Afanasyeva Z. — Effect of anesthesia and comorbid pathology on the postoperative course of patients with colorectal cancer. 153

Гильфанова Р.А., Афанасьева З.А., Гильфанова Р.А., Зиганшин М.И. —

Коморбидность как фактор риска: последствия для пациентов с колоректальным раком после операций

Gilfanova R., Afanasyeva Z., Gilfanova R., Ziganshin M. — Comorbidity as a risk factor: consequences for patients with colorectal cancer after surgery 159

Долаков И.Г., Гезгиева Р.К., Дакиева Л.М., Бекова З.Б., Торшхоева А.М., Газдиева М.М. —

Эпидемиология рака глотки. клинические особенности рака носоглотки

Dolakov I., Gezgieva R., Dakieva L., Bykova Z., Torshkhoeva A., Gazdieva M. — Epidemiology of pharyngeal cancer. clinical features of nasopharyngeal cancer 164

Загорулько А.И., Нистратов Г.П., Голубцов А.К., Козлов Д.В., Колединский А.Г., Рыков С.П. —

Артериальные анастомозы между наружной и внутренней сонными артериями при кровотечениях у пациентов с распадающимися опухолями головы и шеи. Эндovasкулярный гемостаз и эмболотерапия в интервенционной онкорadiологии

Zagorulko A., Nistratov G., Golubcov A., Kozlov D., Koledinskiy A., Rykov S. — Arterial anastomoses between the external and internal carotid arteries in bleeding in patients with disintegrating tumors of the head and neck. Endovascular hemostasis and embolotherapy in interventional oncoradiology. 171

Классов А.М., Немцева Л.А., Веснина О.В., Генина В.А., Иващенко В.В., Попова Е.А. —

Персонализированные подходы к прогнозированию, профилактике и лечению преэклампсии: многоцентровое проспективное исследование

Klassov A., Nemtseva L., Vesnina O., Genina V., Ivashchenko V., Popova E. — Personalized approaches to prediction, prevention, and treatment of preeclampsia: a multicenter prospective study. 179

Мурашко Р.А., Макарова Ю.М., Козлова А.Г., Горьковой А.В., Андреев Д.В. —

Полный метаболический ответ при первично-множественном раке на фоне комбинированной терапии: роль синергии иммунотерапии, таргетной и химиотерапии

Murashko R., Makarova Yu., Kozlova A., Gorkovoy A., Andreev D. — Complete metabolic response in primary multiple cancer against the background of combination therapy: the role of synergy of immunotherapy, targeted and chemotherapy 185

Никифоров И.А., Чернобровкина Т.В., Костюк Г.П., Бурьгина Л.А., Белова М.Ю., Истомина В.В., Кардашян Р.А., Изумнов С.А. —

Нейровоспаление в патогенезе постковидного синдрома (обзор литературы) Часть II

Nikiforov I., Chernobrovkina T., Kostyuk G., Burigina L., Belova M., Istomina V., Kardashyan R., Igumnov S. — Neuroinflammation in the Pathogenesis of Post-COVID Syndrome (Literature Review) Part II. 192

Оздоева Т.И. — Факторы риска и предикторы преждевременных родов у женщин с многоплодной беременностью

Ozdоеva T. — Risk factors and predictors of premature birth in women with multiple pregnancies 203

Полиданов М.А., Волков К.А., Петрунькин Р.П., Кашихин А.А., Власова Т.В., Хакимова Ф.М. —

Влияние амилоидоза надпочечников на канцерогенез

Polidanov M., Volkov K., Petrunkin R., Kashikhin A., Vlasova T., Khakimova F. — The effect of adrenal amyloidosis on carcinogenesis. 210

Рошцин Е.М. — Оптимизация протоколов немедленной и ранней нагрузки дентальных имплантатов с учетом плотности кости и окклюзионных факторов

Rochshin E. — Optimization of immediate and early loading protocols for dental implants taking into account bone density and occlusal factors 214

Рошцин Е.М. — Хирургические аспекты лечения заболеваний височно-нижнечелюстного сустава артроцентез и артроскопия как методы выбора

Rochshin E. — Surgical aspects of treating temporomandibular joint disorders: arthrocentesis and arthroscopy as methods of choice 219

Рухлядьева Е.А. — Эпидемиологические аспекты распространенности эндокринных заболеваний в условиях изменяющейся экологической среды <i>Rukhlyadyeva E.</i> — Epidemiological aspects of the prevalence of endocrine diseases under changing environmental conditions 224	contraceptives in the correction of dysmenorrhea: results of a prospective comparative study 231
Тимофеев И.А., Пономарев В.В., Артюшков В.В., Глашев Д.А. — Возраст-ассоциированная эффективность низкодозированных комбинированных оральных контрацептивов в коррекции дисменореи: результаты проспективного сравнительного исследования <i>Timofeev I., Ponomarev V., Artyushkov V., Glashev D.</i> — Age-associated efficacy of low-dose combined oral	Хмара А.Д., Полиданов М.А., Капралов С.В., Петрунькин Р.П., Чупахин Н.В., Горбунова Е.С. — Экспериментальное обоснование способа фотодинамической стимуляции спаечного процесса в плевральной полости у лабораторных животных <i>Khmara A., Polidanov M., Kapralov S., Petrunkin R., Chupakhin N., Gorbunova E.</i> — Experimental substantiation of the method of photodynamic stimulation of adhesions in the pleural cavity in laboratory animals 235
	Наши авторы 240

ОСОБЕННОСТИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТВЕРДЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ В КНР

ON THE MAIN INDICATORS OF ENVIRONMENTAL MONITORING OF WASTEWATER AND ATMOSPHERE IN CHINA

**P. Bednov
N. Veshneva**

Summary. The relevance of the problems of environmental monitoring of industrial facilities is increasing due to the development of production facilities and stricter requirements for environmental safety. The experience of neighboring countries, which have not only common borders with our country, but also similar conditions for the development of production, is interesting and important for Russia. The purpose of this article is a comprehensive analysis of environmental monitoring of industrial enterprises of the People's Republic of China (PRC) in order to study the possibilities of its adaptation in the Russian Federation (hereinafter RF). To achieve this goal, the article solves several tasks, namely: determining the main indicators of the environmental monitoring system for wastewater and the atmosphere in China; identifying those that can be successfully adapted to the specifics of environmental monitoring of the industrial sector of our country. The material of the article is the provisions of the open report of the Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China for 2022 and a number of publications of national portals related to industry. Analytical, empirical and statistical methods were used, as well as generalization based on the synthesis of information. As a result, it is shown that environmental monitoring of wastewater and atmosphere in China functions as a comprehensive two-level system for remote analysis of various indicators in real time. For each of the areas (water pollution, atmospheric pollution), the key indicators used in the analysis are highlighted, and in some cases the methods of their calculation are given. The conclusion shows that although remote environmental monitoring in China has its own characteristics at each level, its principles can be used as the basis for the formation of approaches to the development of remote environmental monitoring of industrial facilities in Russia.

Keywords: environmental monitoring, industrial enterprises, controlled pollution, monitoring indicators.

Введение

В 2022 году в Китайской Народной Республике (далее КНР) было проведено обширное экологическое исследование [1], которое включало обследование источников выбросов.

В частности, были исследованы: 176528 промышленных предприятий, 13527 станций очистки сточных вод

Аннотация. Актуальность проблем экологического мониторинга объектов промышленности возрастает в связи с развитием производств и ужесточением требований к экологической безопасности окружающей среды. Для России интересен и важен опыт стран-соседей, имеющих с нашей страной не только общие границы, но и сходные условия развития производства. Целью данной статьи является всесторонний анализ экологического мониторинга промышленных предприятий Китайской народной республики (КНР) для исследования возможностей его адаптации в Российской Федерации (далее РФ). Для достижения цели в статье решается несколько задач, а именно: определение основных показателей системы экологического мониторинга сточных вод и атмосферы в КНР; выявление тех, которые можно успешно адаптировать к особенностям эко мониторинга промышленного сектора нашей страны. *Материалом статьи* служат положения открытого доклада Министерства природопользования КНР за 2022 г. и ряд публикаций национальных порталов, связанных с промышленностью. Используются аналитический, эмпирический и статистический методы, а также обобщение на основе синтеза сведений. *В результате* показано, что экологический мониторинг сточных вод и атмосферы в КНР функционирует как комплексная двухуровневая система дистанционного анализа различных показателей в режиме реального времени. По каждому из направлений (загрязнение вод, загрязнение атмосферы) выделены ключевые показатели, используемые при анализе, в ряде случаев приведены методики их расчета. *Заключение* показывает, что хотя дистанционный экологический мониторинг в КНР на каждом уровне имеет свои особенности, его принципы могут быть положены в основу формирования подходов к разработке дистанционного экологического мониторинга объектов промышленности в России.

Ключевые слова: экологический мониторинг, промышленные предприятия, контролируемые загрязнения, показатели мониторинга, сточные воды, загрязнение атмосферного воздуха.

(включая сельские очистные сооружения с суточной мощностью свыше 500 тонн), 2645 предприятий по утилизации бытовых отходов (включая заводы по централизованной переработке пищевых отходов), 2512 заводов по централизованной переработке опасных отходов (включая медицинские отходы). Результатами обследования стали поистине впечатляющие объемы выявленных на предприятиях выбросов в атмосферу, за-

грязнений сточных вод, образование отходов, включая вредные и опасные отходы подлежащие утилизации (Таблица 1).

Таблица 1.
Объемы и источники контролируемых загрязнений.

Виды контролируемых загрязнений	По видам и источникам загрязнений	тыс. т	
Выбросы в сточных водах	Общий объем выбросов химического потребления кислорода (ХПК), всего	25958	
	из них:		
	— Промышленные источники (включая неприоритетные)	369	
	— Сельскохозяйственные источники	17857	
	— Бытовые источники	7722	
	— Централизованные очистные сооружения (включая фильтраты)	11	
	Общий объем выбросов аммиачного азота	820	
	из них:		
	— Промышленные источники (включая неприоритетные)	14	
	— Сельскохозяйственные источники	281	
	— Бытовые источники	525	
	— Централизованные очистные сооружения (включая фильтраты)	1	
	Выбросы в атмосферу	Общий объем выбросов диоксида серы (SO ₂)	2435
		из них:	
— Промышленные источники		1935	
— Бытовые источники		597	
— Централизованные очистные сооружения		3	
Общий объем выбросов оксидов азота (NO _x)		8957	
из них:			
— Промышленные источники		3333	
— Бытовые источники		339	
— Мобильные источники (транспорт)		5267	
— Централизованные очистные сооружения		19	
Общий объем выбросов твердых частиц (пыли)		4934	
Из них			
— Промышленные источники		3057	

Виды контролируемых загрязнений	По видам и источникам загрязнений	тыс. т
Выбросы в атмосферу	— Бытовые источники	1823
	— Мобильные источники (транспорт)	53
	— Централизованные очистные сооружения	1
	Общий объем выбросов летучих органических соединений (ЛОС), всего	5661
	из них:	
	— Промышленные источники	1955
	— Бытовые источники	1794
	— Мобильные источники (транспорт)	1912
Обращение с твердыми отходами	Образование обычных промышленных твердых отходов	41440
	из них:	
	— Переработано	2370
	— Утилизировано	890
	Образование промышленных опасных отходов	95148
	из них:	
— Переработано и утилизировано	94439	

Цель данной статьи — определить подходы к созданию экологического мониторинга промышленных предприятий в России на базе китайского опыта в части обращения с твердыми отходами промышленных предприятий.

Задачи работы: 1) изучить ключевые параметры, которые существенны для экомониторинга Китая по направлению контроля атмосферного воздуха и качества воды; 2) определить те из них, которые возможно адаптировать к российским условиям.

Материалы и методы

Объектом исследования являются показатели экологического мониторинга, применяемые китайскими промышленными предприятиями. Основным материалом — данные открытых источников, опубликованных на портале Министерства экологии и природных ресурсов КНР, а также ряд документов (доклады, отчеты, справки, результаты сбора данных), полученные автором в ходе непосредственной работы в экологических департаментах промышленных предприятий КНР. В работе применены методики: кабинетных исследований нормативных государственных актов КНР, полевых исследований на базе широкого анкетирования и сбора

отчетных материалов на промышленных предприятиях, обобщения выполнены в опоре на методы сравнительного и эмпирического анализа.

Результаты и обсуждение

Объем образования обычных промышленных твердых отходов — это, как известно, фактическое количество неопасных промышленных отходов, образованных на предприятиях за отчетный год. В КНР выделяют обычные и опасные промышленные отходы, существует кодификатор, с помощью которого определяют качественные показатели экологического мониторинга (Таблица 2). С помощью такого кодификатора государство отслеживает не только количество образовавшихся отходов, но и степень причиняемого ими вреда.

Таблица 2.
Виды неопасных промышленных отходов и их кодификация в КНР

Код	Наименование	Код	Наименование
SW01	Металлургический шлак	SW06	Гипс, образующийся при десульфурзации (сероочистке) дымовых газов
SW02	Зола-унос (пылевидная зола угольных ТЭС)	SW07	Ил — осажденные твердые вещества, выделяющиеся при очистке сточных вод на очистных сооружениях, измеряемые по сухой массе.
SW03	Доменный и котельный шлак	SW09	Красная глина (отходы бокситовой переработки), образующиеся при производстве оксидов алюминия или гидроксидов алюминия из алюминиевых руд.
SW04	Порода (пустая порода угледобычи)	SW10	Фосфатный гипс — побочный продукт, образующийся в процессе производства фосфорной кислоты с использованием серной кислоты для разложения фосфоритов, в котором содержатся сульфат кальция, нерастворимые вещества и не переработанные фосфориты
SW05	Хвосты (отходы обогащения руд)	SW99	Другие отходы (отходы от механической обработки, шлифовальные и резательные отходы, отходы из песчаных форм в машиностроении, активированный уголь в пищевой промышленности, обломки кирпича, плитки, бетона в силикатной и строительной промышленности)

Особенностью китайской системы экологического мониторинга является большое количество исключений. Так, например, в обычные промышленные отходы не включаются отходы горной выемки, такие как

вскрышные отходы и отходы выемки, за исключением угольных пустых пород и кислотных или щелочных отходов, а также кислотные или щелочные отходы, в которых pH, после прохождения воды или дождевых вод, составляет менее 4 или более 10,5.

Металлургический шлак включен в систему мониторинга как обычные промышленные отходы, образующиеся в процессе металлургического производства (доменные шлаки, сталеплавильные шлаки, шлаки ферросплавов, марганцевые шлаки и другие). Другие отходы металлургии, которые включены в «Национальный реестр опасных отходов», не учитываются при мониторинге обычных промышленных отходов, считаются опасными.

То же самое касается и отдельных продуктов горения, а также шлаков. Так, например, в КНР термином «зола-унос» обозначают тонкие частицы, улавливаемые из дымовых газов при сжигании угля. Она не включает золу, выбрасываемую из топок угольных установок. Зола-унос в основном образуется в отраслях производства и поставки электроэнергии и тепла, а также других отраслях, использующих угольные установки. Она также известна как летучая зола или дымоходная зола, и в основном собрана из дымовых газов, что примерно соответствует количеству улавливаемой пыли. Или другой пример — доменный и котельный шлак. Это отходы, образующиеся в процессе сжигания топлива в котлах. При мониторинге промышленных выбросов к этому типу отходов не относят пыль, образующуюся при сжигании топлива.

Дополнительными качественными показателями является группа показателей, связанная с переработкой или утилизацией отходов. Например, объем переработанных твердых отходов — это объем отходов, переработанных или преобразованных в полезные ресурсы, энергию и другие исходные материалы посредством переработки, перераспределения, повторного использования или обмена. В КНР он включает объем прошлых годов отходов, использованных в текущем году. Например, отходы могут использоваться в качестве сельскохозяйственных удобрений, для производства строительных материалов, для дорожно-строительных работ и т. д. Эти данные должны быть собраны от организации, которая генерирует эти отходы.

Учитывается и метод утилизации отходов. Например, ряд из них могут нести дополнительный вред и загрязнение в окружающую среду, другие же — быть относительно менее опасными. Такие методы в КНР включают: захоронение (на свалке), сжигание, специализированное хранение (накопление) с последующим захоронением, глубокое закачивание в подземные хранилища, утилизацию в море. Для целей мониторинга учитывают объем утилизации, который включает как собственную утили-

зацию предприятия, так и утилизацию через сторонние организации, а также объем отходов, утилизированных из предыдущих лет. Для системы мониторинга важно, что каждому методу утилизации также присваивается свой код, влияющий на качественную оценку экологического состояния предприятия/региона (подробнее см. Таблицу 3)

Таблица 3.

Методы утилизации опасных отходов (кроме медицинских)

Код	Методы утилизации
R1	Использование в качестве топлива (за исключением прямого сжигания) или для получения энергии другим способом
R2	Восстановление/регенерация растворителей (например, дистилляция, экстракция и т.д.)
R3	Рециркуляция/повторное использование органических веществ, не используемых в качестве растворителей
R4	Рециркуляция/повторное использование металлов и металлических соединений
R5	Рециркуляция/повторное использование других неорганических веществ
R6	Восстановление кислот или щелочей
R7	Восстановление компонентов веществ для снижения загрязнений
R8	Восстановление компонентов катализаторов
R9	Рафинирование отработанных масел или повторное использование других отработанных масел
R15	Прочее
D1	Захоронение
D9	Физико-химическая обработка (например, испарение, сушка, нейтрализация, осаждение и т.д.), за исключением предварительной обработки перед захоронением или сжиганием
D10	Сжигание
D16	Прочее
C1	Совместная утилизация в цементных печах
C2	Производство строительных материалов
C3	Очистка (упаковочных контейнеров)

Особое внимание в КНР уделяется определению объема опасных отходов, переданных в лицензированные учреждения. Этот показатель приводится как количество опасных отходов, которые были официально отправлены в учреждения, имеющие лицензию на управление опасными отходами для переработки, утилизации или хранения. Лицензия на управление опасными отходами

выдается соответствующими органами в соответствии с Положением о лицензировании управления опасными отходами (в частности, медицинскими, Таблица 4.)

Таблица 4.

Методы утилизации опасных медицинских отходов

Код	Методы утилизации
Y10	Сжигание медицинских отходов
Y11	Обработка медицинских отходов с использованием пара высокой температуры
Y12	Химическая дезинфекция медицинских отходов
Y13	Обработка медицинских отходов с использованием микроволн
Y16	Другие методы утилизации медицинских отходов

Отдельные показатели, связанные с утилизацией твердых бытовых отходов (ТБО), опасных и медицинских отходов, специфичные для каждого типа отходов и каждого типа предприятий в данной статье не приводятся.

Благодаря широкому набору данных, поступающих в автоматизированном режиме в единую систему экологического мониторинга страны, а также целому спектру качественных характеристик разного уровня, в КНР сформирован классификатор экологических инвестиционных проектов, направленных на очистку и переработку по трем обсуждаемым в данной статье направлениям — сточные воды, загрязнения атмосферного воздуха, твердые отходы.

Инвестпроекты разделяются на 14 категорий:

1. Очистка сточных вод промышленного производства.
2. Очистка отходящих газов от промышленных выбросов посредством дезульфурации.
3. Очистка отходящих газов от промышленных выбросов посредством деазотирования.
4. Очистка других видов отходящих газов.
5. Очистка общих промышленных твердых отходов.
6. Очистка опасных отходов (для собственных объектов предприятия).
7. Очистка шума (включая вибрацию).
8. Очистка от электромагнитных излучений.
9. Очистка от радиоактивных веществ.
10. Очистка загрязнений в промышленном производстве почвы.
11. Очистка загрязнений в почвах горнодобывающих производств.
12. Покупка и установка автоматических приборов для мониторинга загрязнений.
13. Перемещение загрязняющих источников.
14. Другие виды очистки (включая комплексные меры).

Иными словами, государство, благодаря классификатору, более или менее точно знает на что конкретно будут потрачены инвестируемые средства, какие показатели эффективности нужно использовать, чтобы оценить успешность проекта, и каков ожидаемый экономический эффект. Источниками финансирования для этих инвестиций являются различные виды денежных средств, полученных для решения экологических вопросов, например, дополнительные государственные субсидии и средства, собранные предприятиями.

Для оценки используется также термин «новая проектная мощность, достигнутая при завершении проекта» — т.е. мощность, которую могут достичь основные (или главные) инженерные сооружения (или оборудование), а также сопутствующие вспомогательные сооружения (или оборудование) при нормальных условиях.

Единицы измерения проектной мощности по трем ключевым направлениям очистки (сточные воды, атмосферные выбросы, твердые отходы): проектная мощность для очистки сточных вод измеряется в тоннах/день (t/d); проектная мощность для очистки отходящих газов измеряется в нормальных кубических метрах/час (m³/h); проектная мощность для очистки твердых отходов измеряется в тоннах/день (t/d).

Выводы и заключение

В данном исследовании мы фокусировались на количественных показателях, связанных с контролем об-

ращения с твердыми отходами промышленных предприятий. Подводя итоги, выделим основные качества непрерывного экомониторинга, который мог бы получить широкое распространение в России на базе опыта китайских промышленных предприятий.

Во-первых, на федеральном уровне потребуется расширение охвата цифровизации и унификацией применяемых систем экологического мониторинга на предприятиях с параллельным созданием централизованной системы приема и регистрации экологических показателей федерального уровня в режиме реального времени, как это функционирует на территории КНР, в частности по загрязнению вод и атмосферного воздуха.

Во-вторых, большинство китайских количественных и качественных показателей уровня отдельного рассчитываются по сходным с российскими предприятиями методикам, и при условии отладки инструментального контроля с помощью датчиков применимы на территории России.

Анализ системы показателей экологического мониторинга промышленных предприятий КНР целесообразно продолжить и дополнить третьей составляющей — мониторингом переработки отходов. Это позволит предпринять шаги на пути сближения экологических практик наших стран, учесть передовой опыт, повысить общую экологическую безопасность в России и Китайской народной республики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Министерство экологии и природных ресурсов Китайской народной республики. — Официальный портал. — Электронный ресурс: <http://english.mee.gov.cn/> (дата обращения: 18.02.2025).
2. Ежегодный доклад о результатах экологического мониторинга за 2022 г. — Министерство экологии и природных ресурсов Китайской народной республики. — Официальный портал. — Электронный ресурс: <https://big5.mee.gov.cn/gate/big5/www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthtjnb/202312/W020231229339540004481.pdf> (дата обращения 20.02.2025).
3. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий определению условий выпуска его в водные объекты. — ФГУП «НИИ ВОДГЕО». — с.10 Электронный ресурс: <https://akstok.com/wp-content/uploads/2019/08/Rekomendatsii-NII-VODGEO-po-raschyotu-sistem-ochistki-livnevnyh-stokov.pdf> (дата обращения 25.02.2025).
4. Государственный доклад Министерства природных ресурсов и экологии РФ «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году». — Электронный ресурс: <https://2023.ecology-gosdoklad.ru/doklad/atmosfernyy-vozduh/vybrosy-zagryaznyayuschih-veschestv/> (дата обращения 24.02.2025).
5. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. — НИИ Атмосфера. — Санкт-Петербург, 2005. — с.18. — Электронный ресурс <https://neftetank.ru/upload/iblock/8db/557.pdf> (дата обращения 25.02.25)
6. SHEN L.J., LIANG S.W., WU Y.T., et al., 2018. Pollution characteristics and source apportionment of VOCs in ambient air of a residential area in Wuhan [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 10(5): 527–535.
7. LI K.W., YING F., CHEN L.H. et al., 2019. Ambient VOCs characteristics and associated effects in urban Hangzhou [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 53(1): 1–13.
8. QIA Y.Q., SHEN L.M., ZHANG J.L. et al., 2019. Species and release characteristics of VOCs in furniture coating process [J]. Environmental Pollution, 245: 810–819.
9. BARI M.A., KINDZIERSKI W.B., 2018. Ambient volatile organic compounds (VOCs) in Calgary, Alberta: sources and screening health risk assessment [J]. Science of The Total Environment, 631–632: 627–640.
10. GAO Z.Q., HU G.J., WANG H. et al., 2019. Characterization and assessment of volatile organic compounds (VOCs) emissions from the typical food manufactures in Jiangsu province, China [J]. Atmospheric Pollution Research, 10(2): 571–579.

СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ КЛИНИЧЕСКОЙ БИОХИМИИ В ЛАБОРАТОРНОЙ ДИАГНОСТИКЕ ОСТРОГО И ХРОНИЧЕСКОГО ПАНКРЕАТИТА

MODERN CLINICAL BIOCHEMISTRY POSSIBILITIES IN LABORATORY DIAGNOSTICS OF ACUTE AND CHRONIC PANCREATITIS

N. Bugero
S. Aleksandrova
A. Titova
D. Yakimova
E. Pavlova

Summary. During the development and application of diagnostic methods for biochemical parameters: alpha-amylase, glucose and total bilirubin in two groups of people, the following results were obtained: when determining the activity of alpha-amylase, an increased level of activity of this enzyme was shown in both forms of pancreatitis: in acute pancreatitis, the indicators exceed normal values by 3.95 times, in chronic pancreatitis they did not exceed the norm. When determining the glucose level in acute pancreatitis, the readings were 1.8 times higher than normal, in chronic pancreatitis — 1.2 times. When determining bilirubin in the blood, an increased level of its total value was noted in patients with chronic pancreatitis — 1.4 times. The study showed that patients of different age categories with acute and chronic pancreatitis have differences in biochemical blood parameters. Perhaps, age can affect the severity of the disease and the response to treatment. Further research is needed to better understand the effect of age on biochemical processes in pancreatitis. The study data showed differences in the distribution of patients by age and gender depending on the form of pancreatitis. Women older than working age are more susceptible to chronic pancreatitis, while in men this applies to the acute form of the disease. The study revealed that gallstone disease is observed mainly in women who were diagnosed with chronic pancreatitis.

Keywords: pancreatitis, biochemistry, gallstone disease, alpha-amylase, glucose, bilirubin.

Бугеро Нина Владимировна

доктор биологических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Псковский государственный университет»
bugero@mail.ru

Александрова Светлана Михайловна

кандидат химических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Псковский государственный университет»
superkandidat@rambler.ru

Титова Анна Александровна

старший преподаватель,
ФГБОУ ВО «Псковский государственный университет»
titova.anna1907@yandex.ru

Якимова Дарья Вячеславовна

ФГБОУ ВО «Псковский государственный университет»
darya.ybugero@mail.ru

Павлова Елена Владимировна

Кандидат педагогических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Псковский государственный университет»
suore9@mail.ru

Аннотация. В ходе освоения и применения методов диагностики биохимических показателей: альфа-амилазы, глюкозы и общего билирубина у двух групп людей были получены следующие результаты: при определении активности альфа-амилазы в работе был показан повышенный уровень активности данного фермента при обеих формах панкреатита: при остром панкреатите показатели превышают нормальные значения в 3,95 раз, при хроническом не превысило нормы. При определении уровня глюкозы при остром панкреатите показания были выше нормы в 1,8 раза, при хроническом — в 1,2 раза. При определении билирубина в крови был отмечен повышенный уровень его суммарного значения у больных хроническим панкреатитом — в 1,4 раза. Исследование показало, что у пациентов разных возрастных категорий с острым и хроническим панкреатитом отмечаются различия в биохимических показателях крови. Возможно, возраст может влиять на тяжесть заболевания и ответ на лечение. Дальнейшие исследования необходимы для более глубокого понимания влияния возраста на биохимические процессы при панкреатите. Данные исследования показали различия в распределении пациентов по возрасту и полу в зависимости от формы панкреатита. Женщины старше трудоспособного возраста более подвержены хроническому панкреатиту, в то время как у мужчин это относится к острой форме болезни. В ходе исследования было выявлено, что желчнокаменная болезнь наблюдается в основном у женщин, которым был поставлен диагноз хронический панкреатит.

Ключевые слова: панкреатит, биохимия, желчнокаменная болезнь, альфа-амилаза, глюкоза, билирубин.

Введение

Одним из ключевых и ещё не полностью решённых вопросов в медицине является диагностика острого и хронического панкреатита. Несмотря на прогресс в диагностике панкреатита, в стационарных условиях до 26 % случаев ошибочно диагностируются, а до 17,2 % пациентов с подозрением на другие острые хирургические заболевания подвергаются хирургическому вмешательству из-за неправильной диагностики острого панкреатита [16].

К сожалению, на сегодняшний день не существует абсолютно надёжной методики для диагностики панкреатита. Для его диагностики используются комплексные методы, включающие клинический анализ, лабораторные тесты и визуальные исследования.

Из-за высокой распространённости острого панкреатита в мире и частой летальности его деструктивных форм, эта проблема привлекает значительное внимание. В контексте болезней желудочно-кишечного тракта панкреатит выделяется своим многообразием клинических симптомов, высокой вероятностью серьёзных осложнений, сложностью выбора методов лечения и неблагоприятными прогнозами. Основными причинами заболевания являются желчнокаменная болезнь и чрезмерное употребление алкоголя. В данном контексте важно изучать статистические данные о распространённости и летальности при остром панкреатите на уровне отдельных регионов, так как проблема летальных исходов из-за неправильной диагностики, а впоследствии неправильного лечения, на сегодняшний день является актуальной [21].

Затруднения при выявлении и оценке степени тяжести острого панкреатита могут возникнуть из-за разнообразной природы заболевания, его нетипичных симптомов и отсутствия специфических лабораторных показателей. Использование панкреатических ферментов в качестве биомаркеров в настоящее время не является ни специфичным, ни удобным, поэтому исследование патогенеза острого панкреатита и поиск новых лабораторных критериев для диагностики, оценки степени тяжести и прогнозирования остаётся актуальной задачей.

Поджелудочная железа выполняет множество важных функций, и их нарушение приводит к дисфункции ключевых органов и систем, включая желудочно-кишечный тракт, развитие панкреатита, сахарного диабета и других сопутствующих заболеваний.

Увеличение числа заболеваний, развитие серьёзных осложнений и смертность при остром панкреатите (ОП), хроническом панкреатите (ХП) подчёркивают важность

проведения глубокого анализа данных заболеваний. Острый панкреатит (ОП) является одним из самых распространённых острых хирургических заболеваний в области брюшной полости [17]; на 100000 человек в год приходится 34 случая ОП без значительных различий между полом. Распространённость хронического панкреатита (ХП) среди населения различных стран колеблется от 0,2 до 0,68 %, а среди пациентов с заболеваниями желудочно-кишечного тракта достигает 6–9 %; [18] на 100000 человек в год приходится 10 случаев, при этом у мужчин этот показатель выше (12 случаев на 100000 человек в год), чем у женщин (6 случаев на 100000 человек в год).

Примерно 20 % пациентов переходят от первого случая ОП к рецидивирующему состоянию, а около 35 % из них развивают хронический панкреатит (ХП); у пациентов с ХП в 1,8–4 % случаев РПЖ развивается в течение 10–20 лет после установления диагноза [20].

В медицине используются различные методы по выявлению заболеваний поджелудочной железы. Тем не менее, лабораторные тесты по-прежнему остаются значимыми при таких патологиях. Современные биохимические методы анализа крови и мочи позволяют не только оценить степень патологического изменения в поджелудочной железе, выявить тип панкреатита, но и внести коррективы в терапию вовремя. Изменения в биохимических показателях часто происходят ещё до того, как появляются клинические симптомы болезни, и они служат предупреждающими сигналами о проблемах в работе органов и систем.

Важность точной диагностики острого панкреатита подчёркивается высокой смертностью, которая может достигать 30–40 % и более при серьёзных некротических формах заболевания [11].

Учитывая всё вышеперечисленное, диагностика с помощью биохимических исследований на данный момент остаётся востребованной и актуальной.

Цель исследования

Проанализировать некоторые биохимические показатели сыворотки крови у пациентов с острым и хроническим панкреатитом для выявления особенностей этих показателей в зависимости от формы панкреатита, возраста пациента, пола и наличия желчнокаменной болезни.

Методы исследования

Объектом исследования являются медицинские карты пациентов Псковской областной клинической больницы. Предметом исследования является архивные

данные по материалам ГБУЗ Псковская областная клиническая больница, результаты биохимического анализа крови, пол, возраст, желчнокаменная болезнь.

Исследование проводилось в архиве на базе Псковской областной клинической больницы в период с 5.02.2024 по 18.05.2024. Были отобраны и проанализированы истории болезни 50 пациентов с диагнозом острого или хронического панкреатита, поставленного с 2021 по 2023 год. Из 50 историй болезни, 18 пациентам был поставлен диагноз острого панкреатита, а 32 — хронического панкреатита. У всех пациентов изучались следующие биохимические показатели: активность сывороточной амилазы, уровень глюкозы в крови и общий билирубин.

Для исследования образцы крови брали у людей разных возрастных категорий. В соответствии с диагнозом больные были распределены на две основные группы, приведённые в таблице 1.

Таблица 1.

Возраст, лет	Пол	ОП (острый панкреатит)	ХП (хронический панкреатит)	Всего
До 20	Женщины	1	—	1
	Мужчины	1	—	1
От 20 и старше	Женщины	6	9	15
	Мужчины	4	7	11
Старше трудоспособного возраста	Женщины	3	8	11
	Мужчины	3	8	11
Всего		18	32	50

Первую группу составили пациенты с острым панкреатитом 18 пациентов, из которых 10 женщин и 8 мужчин. Вторую группу составили пациенты с хроническим панкреатитом, в которую вошли 32 пациента (17 женщин и 15 мужчин). По возрастным категориям распределение представлено в таблице 1. Доля общего острого панкреатита составила 36 %, а хронического — 64 % от общей заболеваемости.

Следующим этапом работы явилось изучение биохимического анализа крови, пол, возраст и наличие желчнокаменной болезни пациентов с острым и хроническим панкреатитом. Показатели активности альфа-амилазы в сыворотке крови больных панкреатитом. Нормальный уровень альфа-амилазы в крови обычно колеблется от 0 до 100 единиц/л. Однако, при остром панкреатите, поджелудочная железа может вырабатывать большее количество альфа-амилазы, что приводит к ее попаданию в кровоток. В таких случаях уровень амилазы может увеличиваться в 3–4 раза по отношению к верхней границе нормы. Это повышение уровня аль-

фа-амилазы, в сочетании с клиническими проявлениями, как, например, боли в животе, тошнотой, рвотой и повышением температуры тела, является важным показателем для диагностики острого панкреатита.

Проведенный анализ медицинских карт показал, что уровень альфа-амилазы у больных острым и хроническим панкреатитом значительно повышен. При остром панкреатите активность сывороточной амилазы в среднем составляла 395 ± 123 Ед/л, что почти в четыре раза превышает нормальные значения и является диагностически значимым для острого панкреатита. Максимальное значение уровня амилазы в крови у больных составило 618 Ед/л, что также указывает на серьезное поражение поджелудочной железы.

С другой стороны, уровень амилазы в крови при хроническом панкреатите в среднем составил 56 ± 23 Ед/л, что не превышает допустимых норм и может оставаться в пределах нормы. Однако у 4 больных уровень амилазы был ниже нормы, что может свидетельствовать о хроническом процессе без обострения. В то же время максимальное значение амилазы в крови у пациентов с хроническим панкреатитом составило 94,6 Ед/л, что может указывать на возможное обострение процесса.

Следует отметить, что снижение уровня амилазы до нормальных значений не всегда является признаком хорошего прогноза. Резкое снижение уровня амилазы, когда пациент серьезно болен, указывает на то, что в самой железе идет деструктивный процесс. При хроническом панкреатите концентрация ферментов поджелудочной железы вне острой фазы не повышается и может даже снижаться. При обострении хронического панкреатита активность альфа-амилазы может повышаться в 3–5 раз.

Изучение статистических показателей содержания глюкозы у больных панкреатитом показало, что при остром панкреатите практически у всех пациентов отмечается гипергликемия. Средний уровень глюкозы составляет $10,74 \pm 4,04$ ммоль/л, что превышает верхний порог диапазона (5,9 ммоль/л) в 1,8 раза. При хроническом панкреатите уровень глюкозы также повышен и составляет в среднем $7,61 \pm 3,03$ ммоль/л. Максимальное значение глюкозы у пациентов с хроническим панкреатитом достигало 16,71 ммоль/л. Это может свидетельствовать о частых обострениях заболевания и постепенном разрушении и склерозировании островков Лангерганса поджелудочной железы.

Сравнение двух групп пациентов показало, что уровень глюкозы в крови при остром панкреатите превышает показатели при хроническом панкреатите в 1,4 раза. Важно отметить, что у некоторых пациентов уровень глюкозы находится в пределах нормы, что может

указывать на то, что начавшийся воспалительный процесс в поджелудочной железе еще не привел к угнетению выработки инсулина.

При остром панкреатите примерно в 50 % случаев наблюдается транзиторная гипергликемия, вызванная увеличением секреции глюкагона. Стабильная гипергликемия отмечается у 15 % пациентов. После лечения острого панкреатита уровень глюкозы обычно нормализуется, но при более тяжелом течении заболевания может потребоваться инсулинотерапия из-за возможного развития гипергликемического сахарного диабета [26].

Поджелудочная железа тесно связана с печенью и системой желчных протоков, и поэтому заболевания печени и желчного тракта могут привести к развитию панкреатита. Одной из наиболее распространенных причин острого панкреатита является холелитиаз и закупорка желчными камнями сфинктера Одди, что приводит к билиарному панкреатиту. Исследование показало, что у больных с острым и хроническим панкреатитом часто наблюдается повышение уровня печеночных ферментов (АЛТ, АСТ) и билирубина.

У 4 пациентов с острым панкреатитом наблюдалась гипербилирубинемия, причиной которой, вероятно, стала закупорка желчными камнями и нарушение пассажа желчи в двенадцатиперстную кишку.

Максимальное значение общего билирубина достигло 76,7 мкмоль/л, а средние значения составили $17,65 \pm 16,37$ мкмоль/л. Гипербилирубинемия при остром панкреатите может быть связана с гиперпродукцией билирубина и упорным нарушением пассажа желчи.

У 9 пациентов с хроническим панкреатитом также наблюдалось повышение уровня билирубина. Средние

значения составили $19,93 \pm 15,07$ мкмоль/л. Билирубин, конечный продукт деградации гема в гепатоцитах, обычно выделяется в желчь и поступает в кишечник для выведения из организма. Повышенный уровень билирубина у пациентов с хроническим панкреатитом может свидетельствовать о нарушениях в желчных протоках и возможных патологиях желчного пузыря. «Появление его в крови свидетельствует о нарушении обмена из-за повреждения гепатоцитов или обструкции желчных путей». «Повышение уровня билирубина в сыворотке крови чаще всего связывают с воспалительной реакцией вокруг желчного пузыря, которая проявляется не только увеличением уровня билирубина, но и повышением числа лейкоцитов, активности ферментов поджелудочной железы и абдоминальными болями».

Распространенность желчнокаменной болезни у пациентов с панкреатитом

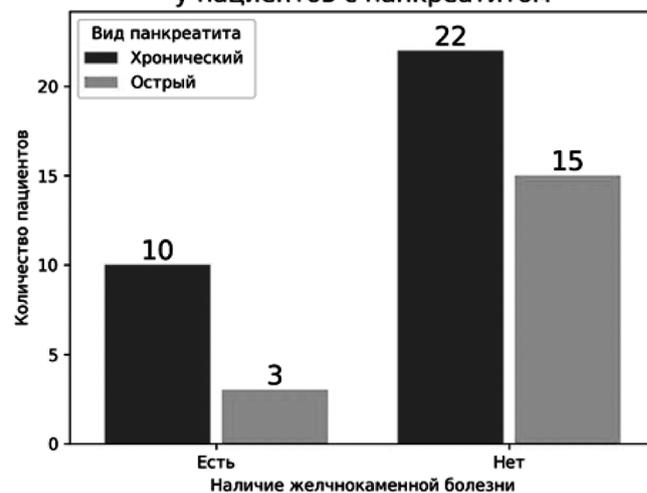
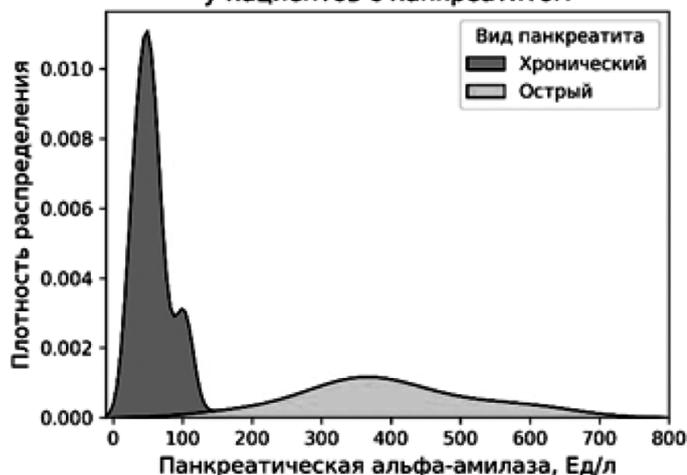


Рис. 1. Сочетания желчнокаменной болезни и формы панкреатита у исследуемой группы пациентов

Распределения концентрации амилазы у пациентов с панкреатитом



Распределения концентрации билирубина у пациентов с желчнокаменной болезнью

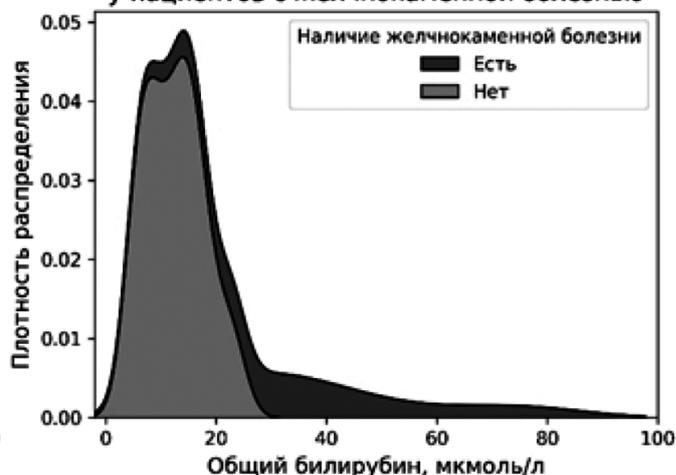


Рис. 2. Плотности распределения концентраций амилазы и билирубина у пациентов с панкреатитом и желчнокаменной болезнью

Сопутствующая желчнокаменной болезнь была зарегистрирована у 13 (26 %) пациентов: у 3 пациентов с острым панкреатитом и у 10 пациентов с хроническим панкреатитом (Рисунок 1).

Концентрация панкреатической альфа-амилазы находилась в более узком диапазоне и чаще в пределах референсных значений у пациентов с хроническим панкреатитом, в то время как у пациентов с острым панкреатитом наблюдался выраженный размах значений: от референсных, до значений в более чем 6 раз превышающих референс. Концентрация общего билирубина была в пределах референса или незначительно превышала последний у большей части пациентов без жел-

чнокаменной болезни, и значимо превышала референс только у пациентов с наличием желчнокаменной болезни (Рисунок 2).

По результатам исследования установлено, что концентрация панкреатической альфа-амилазы у пациентов с острым панкреатитом статистически значимо превышает этот показатель у пациентов с хроническим панкреатитом. В частности, у пациентов с острым панкреатитом концентрация панкреатической альфа-амилазы была выше в 7,3 раза по сравнению с пациентами с хроническим панкреатитом (382.0 [335.8; 451.5] против 52.5 [39.2; 64.0] Ед/л соответственно). Также концентрация глюкозы у пациентов с острым панкреатитом достоверно выше,

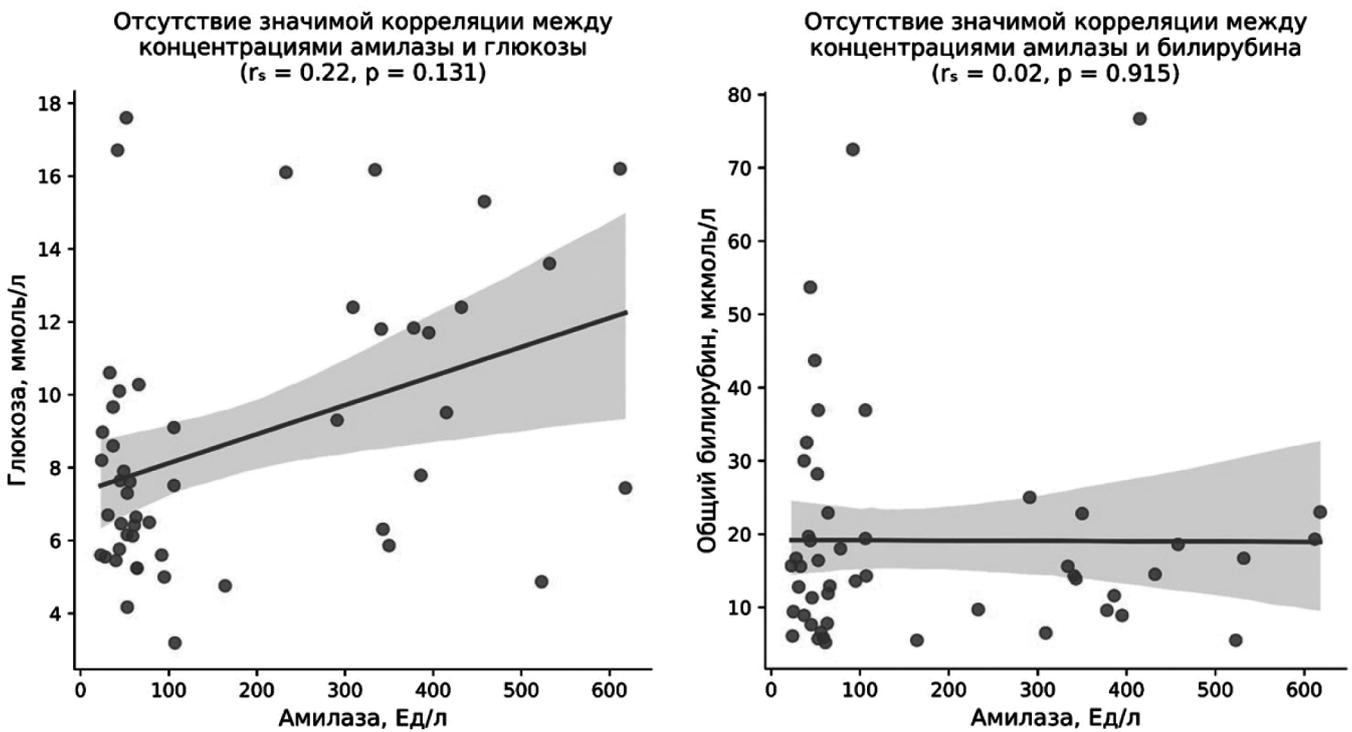


Рис. 3. Анализ исследуемых корреляционных взаимосвязей

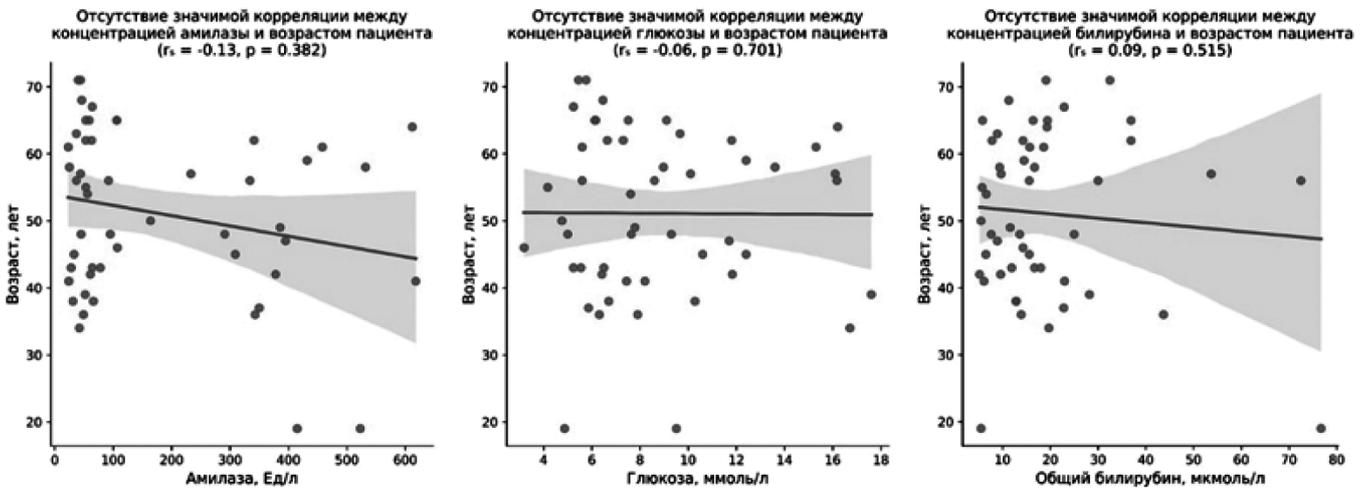


Рис. 4. Корреляционные связи между возрастом пациента и концентрациями амилазы, билирубина и глюкозы

чем у пациентов с хроническим панкреатитом (11.8 [7.5; 13.3] против 6.7 [5.6; 8.7] ммоль/л соответственно). В то время как различий между другими показателями обнаружено не было.

При анализе корреляционных взаимосвязей между уровнем глюкозы, амилазы, билирубина как в подгруппах острого и хронического панкреатита, так и в общих группах статистически-значимых корреляций не обнаружено (Рисунок 3).

Также не было обнаружено значимых корреляционных связей между изучаемыми биохимическими показателями и возрастом пациента (Рисунок 4).

Выводы

Заболевания поджелудочной железы, особенно острый и хронический панкреатит, представляют собой одну из главных и нерешенных проблем неотложной хирургии. В соответствии с данными различных литературных источников, пациенты с острым панкреатитом составляют от 3 до 10 % от общего числа больных. Эти цифры подчеркивают важность острого панкреатита среди хирургических патологий, требующих немедленного вмешательства.

Хронический панкреатит также играет существенную роль в хирургической практике, хотя встречается менее часто по сравнению с острыми формами. Его хрониче-

ский и прогрессирующий характер требует специализированного подхода и длительного лечения [28].

Изложенные в работе результаты анализа архивных данных на базе Псковской областной клинической больницы в очередной раз доказали значимость своевременной лабораторной диагностики панкреатита, важность изменения биохимических показателей в крови у больных данным заболеванием.

В ходе исследования было выявлено, что при диагностике острого и хронического панкреатита информативным тестом является повышение активности альфа-амилазы. Было установлено, что при остром панкреатите в среднем она превышает нормальное значение в 4 раза.

ОП и ХП определяются как мультифакторные и полипатогенетические заболевания. Среди причин их развития на первом месте находится злоупотребление алкоголем и заболевания желчевыводящих путей. В исследовании обозначена однозначная прямая зависимость между данными заболеваниями и одним из этиологических факторов — желчнокаменной болезнью.

Также были проанализированы статистические данные заболеваемости относительно пола и возраста пациентов. На основании архивных данных было выявлено, что в Псковской области за период с 2021 по 2023 года женщины болели чаще мужчин, а основной возраст пациентов приходился от 20 лет и старше, что составляет 52 % от общего числа пациентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданов С.Н., Бабаев С.Ю., Стражнов А.В. [и др.] «Клинико-морфологическая классификация острого панкреатита и его осложнений» // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. — 2016. — Т. 4, № 40. — С. 109–121. — DOI: 10.21685/2072–3032-2016-4-12.
2. Буторова Л.И., Васильев А.П., Козлов И.М. [и др.] «Хронический панкреатит как медико-социальная проблема» // Русский медицинский журнал. — 2008. — Т. 16, № 7. — С. 513–522.
3. Волков В.Е., Чеснокова Н.Н., Волков С.В. «Острый панкреатит» // Текст научной статьи по специальности «Клиническая медицина» — 2016 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ostryy-pankreatit-4/viewer>
4. Губергриц Н.Б. «Возможности лабораторной диагностики заболеваний поджелудочной железы» // Донецкий национальный медицинский университет, Украина. [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-laboratornoy-diagnostiki-zabolevaniy-podzheludochnoy-zhelezy/viewer>
5. Зурнаджянц В.А., Кчибеков Э.А., Сердюков М.А., Бондарев В.А., Диброва Д.С. // Медицинский вестник Юга России, «Острый панкреатит, диагностика и прогноз» [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ostryy-pankreatit-diagnostika-i-prognoz/viewer>
6. Идиятова И.Ю., Кузьмина Л.К., Стяжкина С.Н., «Острый панкреатит» // Журнал «Международный студенческий научный вестник». — 2016. — № 6 [Электронный ресурс] URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=16689>.
7. Имаева А.К., Мустафин Т.И., Половинкина С.Р. «Показатели заболеваемости и смертности при панкреатите как индикатор состояния медицинской помощи на региональном уровне.» 2020;28(6):1298–1303. [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pokazateli-zabolevaemosti-i-smernosti-pri-ostrom-pankreatite-kak-indikator-sostoyaniya-meditsinskoj-pomoschi-na-regionalnom-urovne>
8. Крылов Н.Н. Хирургические болезни: Т. 2: учебник / под ред. Крылова Н.Н. — Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2019. — 592 с. — ISBN 978-5-9704-5099-4. — Текст: электронный // ЭБС «Консультант студента»: [сайт]. — URL: <https://www.studentlibrary.ru/ru/doc/ISBN9785970450994-0002.html?SSr=07E805012F6CE>.
9. Кузин М.И. Хирургические болезни: учебник / М.И. Кузин, Н.М. Кузин, В.А. Кубышкин [и др.]. — 5-е изд., перераб. и доп. — Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2022. — 1024 с. — ISBN 978-5-9704-7014-5. — Текст: электронный // ЭБС «Консультант студента»: [сайт]. — URL: <https://www.studentlibrary.ru/ru/doc/ISBN9785970470145-0016.html?SSr=07E805012F6CE>.
10. Ковалев А.И. Хирургия [Электронный ресурс]: учебник / — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2016. Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785970437568.html>
11. Кост Е.А. Справочник по клиническим лабораторным методам исследования. 1975, изд-во: Медицина, город: М., 384 с.
12. Лаптев В.В., Нестеренко Ю.А., Михайлулов С.В. «Диагностика и лечение деструктивного панкреатита» // Монография, Ульяновский государственный университет 2014. [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/1564179/page:3/>

13. Лычев В.Г., Карманов В.К. /Сестринский уход в терапии. Участие в лечебно-диагностическом процессе: учебник [Электронный ресурс] / — М.: 38 ГЭОТАР-Медиа, 2018. Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785970447246.html>
14. Лепорский Н.И. «Болезни поджелудочной железы [Текст]» / Москва: Медгиз, 1951. — 351 с.: ил.; 23 см. [Электронный ресурс] URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005829169>
15. «Лимфатическая система поджелудочной железы»/National Library of medicine//PubMed — июнь 1997. [Электронный ресурс] URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9220424/>
16. Митрофаненко В.П., Алабин И.В. Основы патологии [Электронный ресурс]: учебник / — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2016. Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785970437704.html>
17. Мусаев Г.Х., С.С. Харнас, В.В. Левкин, А.В. Егоров «Острый панкреатит»// Учебное пособие для студентов старших курсов медицинских вузов, клинических интернов и ординаторов. — М.: Издательский дом «Русский врач», 2006. — 60 с. [Электронный ресурс] URL: <https://www.sechenov.ru/upload/iblock/2de/2de21cb6fd9ff8600cdd9d011e5b446e.pdf?ysclid=1w38w3gm5h437529615>
18. «Острый панкреатит (клинические рекомендации РФ)»//ТОО «MedElement»—, 2013–2024. [Электронный ресурс]. URL: Острый панкреатит > Клинические рекомендации РФ 2018–2020 (Россия) > MedElement
19. «Острый панкреатит (версия клинические протоколы МЗ РК)»//ТОО «MedElement» — Казахстан, 2015. [Электронный ресурс]. URL: <https://diseases.medelement.com/disease/острый-панкреатит/14218>
20. «Острый панкреатит (справочник заболеваний MedElement)»//ТОО «MedElement»— Россия, 2018–2020. [Электронный ресурс]. URL: Острый панкреатит (K85) > Справочник заболеваний MedElement > MedElement
21. Пузина С.Н., Рычковой М.А. Медико-социальная деятельность [Электронный ресурс] / — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2017. Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785970441039.html>
22. Сереброва С.Ю. «Хронический панкреатит: современный подход к диагностике и лечению» // Русский медицинский журнал от 11 марта 2008 [Электронный ресурс]. URL: Хронический панкреатит: современный подход к диагностике и лечению | Сереброва С.Ю. «РМЖ» №1 от 11.03.2008 (rmj.ru)
23. Савельев В.С. Хирургические болезни. В 2 т. Том 1: учебник / под ред. Савельева В.С., Кириенко А.И. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2017. — 720 с. — ISBN 978-5-9704-3998-2. — Текст: электронный // ЭБС «Консультант студента»: [сайт]. — URL: <https://www.studentlibrary.ru/ru/doc/ISBN9785970439982-0013.html?SSr=07E805012F45D>
24. Харлашина Е.А., Кононенко И.В., Смирнова О.М., Майоров А.Ю. «Сахарный диабет, возникший вследствие билиарного рецидивирующего панкреатита»/ Текст научной статьи по специальности «Клиническая медицина»// [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/saharnyy-diabet-voznikshiy-vsledstvie-biliarnogo-retsidiviruyushchego-pankreatita/viewer>
25. Черданцев Д.В., Строев А.В., Первова О.В., Михайлова А.В., Строева М.С. Проблема острого панкреатита в красноярском крае // Современные проблемы науки и образования. — 2019. — № 2.; URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=28731>.
26. Чирьев А.И., Быстров С.В., Ивченко А.О., Ивченко О.А., Гаврилин Е.В. «Острый и хронический панкреатит»: учебное пособие / А.И. Чирьев [и др.]. — Томск: Изд-во СибГМУ, 2020. — 115 с. [Электронный ресурс]. URL: http://elar.ssmu.ru/bitstream/20.500.12701/3228/1/tut_ssmu-2020-13.pdf
27. Rawla P, Sunkara T, Gaduputi V. «Rawla, P. Epidemiology of Pancreatic Cancer: Global Trends, Etiology and Risk Factors» // World J Oncol. — 2019. — Vol. 10(1). — P. 10–27. — DOI: 10.14740/wjon1166
28. Xiao A.Y., Tan M.L., Wu L.M. [et al.] «Global incidence and mortality of pancreatic diseases: a systematic review, meta-analysis, and meta-regression of population-based cohort studies» // Lancet Gastroenterol Hepatol. — 2016. — Vol. 1(1). — P. 45–55. — DOI: .10.1016/S2468-1253(16)30004-8.

© Бугеро Нина Владимировна (bugero@mail.ru); Александрова Светлана Михайловна (superkandidat@rambler.ru);
Титова Анна Александровна (titova.anna1907@yandex.ru); Якимова Дарья Вячеславовна (darya.ybugero@mail.ru);
Павлова Елена Владимировна (cuore9@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

КАРОТИНОИДЫ ПСИХРОТОЛЕРАНТНЫХ ДРОЖЖЕЙ ВОСТОЧНОЙ АНТАРКТИДЫ. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СОСТАВ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПИГМЕНТОВ¹

Грибанова Екатерина Александровна

Аспирант, старший преподаватель, Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь
lika-den98@mail.ru

CAROTENOIDS OF PSYCHROTOLERANT YEAST YEASTS ANTARCTICA. INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE COMPOSITION AND SPECTRAL PROPERTIES OF PIGMENTS

E. Gribanova

Summary. Psychrotolerant yeasts of the genera *Rhodotorula* (3 strains), *Sporobolomyces* (6 strains), *Cystobasidium* (2 strains), isolated from soil samples of East Antarctica, can produce torulene, torularhodin, ζ -carotene, γ -carotene, and δ -carotene. The highest variety of produced pigments was observed during cultivation at 18 °C. Yeasts of the genus *Rhodotorula*, producing carotenoids ζ -carotene and torulene in a ratio of 1:1.8, retained viability for up to 6 minutes of ultraviolet exposure. The presence of torularhodin in the composition ensured higher survival rates of *Rhodotorula* yeasts during irradiation.

Keywords: yeast, spectrophotometry, carotenoids, psychrophiles, torulene, carotene, torularhodin, Antarctica.

Аннотация. Психротолерантные дрожжи родов *Rhodotorula* (3 штамма), *Sporobolomyces* (6 штаммов), *Cystobasidium* (2 штамма), выделенные из почвенных образцов Восточной Антарктиды, способны продуцировать торулен, торулародин, ζ -каротин, γ -каротин и δ -каротин. Наибольшее разнообразие синтезируемых пигментов было определено при культивировании при 18 °C. Дрожжи рода *Rhodotorula*, продуцирующие каротиноиды ζ -каротин и торулен в соотношении 1:1,8, сохраняли жизнеспособность до 6 минут воздействия ультрафиолета. Наличие торулародина в составе обеспечивало более высокие показатели выживаемости дрожжей *Rhodotorula* при облучении.

Ключевые слова: дрожжи, спектрофотометрия, каротиноиды, психрофилы, торулен, каротин, торулародин, Антарктида.

Введение

Каротиноиды представляют собой органические соединения, принадлежащие к 40-углеродным терпеноидам. Они делятся на две группы: каротины, в основном состоящие из углеводов (α -каротин, β -каротин, γ -каротин, торулен и др.), и ксантофиллы, молекулы которых включают углерод, водород и кислород (астаксантин, лютеин, зеаксантин, β -криптоксантин, фукоксантин и кантаксантин). Каротиноидам приписываются разнообразные биологические функции (фотопротекторная, антиоксидантная, провитамин А активность, иммуномодулирующая и другие). Главная роль данных соединений заключается в защите клетки от пагубного воздействия реактивных форм кислорода [1] и различных видов излучения (проникающей радиации, УФ-излучения, лучей видимой и инфракрасной области света) [2].

Значительный интерес для научных исследований вызывают красные дрожжи, которые способны синтези-

ровать каротиноидные соединения. Наиболее детально изученными и часто применяемыми для извлечения пигментов (β -каротин, торулен и торулародин) являются дрожжи рода *Rhodotorula* [2–5].

В 2018 году в исследованиях М. Кот [11] был предложен путь биосинтеза торулена и торулародина в дрожжевых клетках из геранилгеранилпирофосфата (ГППП). В процессе синтеза молекула γ -каротина является предшественником для биосинтеза β -каротина и торулена. Последний, в ходе реакций гидроксирования и окисления, трансформируется до торулародина [10].

В своей структуре торулен и торулародин содержат одно β -иононовое кольцо (см. рисунок 1), соединённое с полиеновой цепью [1]. Согласно спектрофотометрическому исследованию [3], максимумы поглощения торулена находятся при длинах волн 460, 484 и 518 нм в петролейном эфире, а для торулародина — 465, 492 и 523 нм в том же растворителе.

¹ Данная работа была выполнена при поддержке проекта, финансируемого Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований № 20231168 («Продукция биологически активных веществ психрофильными дрожжами, выделенными из образцов почв Восточной Антарктиды»).

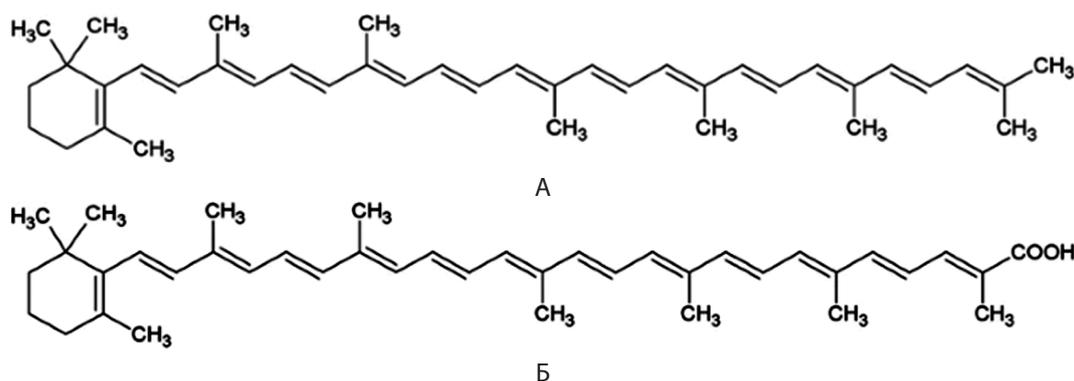


Рис. 1. Структурные формулы торулена (А) и торулародина (Б) [11]

Торулен и торулародин способны синтезировать дрожжи родов *Cystofilobasidium* [1], *Dioszegia* [12, 13], *Neurospora* [14], *Rhodotorula* [2, 18], *Rhodospiridium* [15, 19], *Sporidiobolus* [16, 20] и *Sporobolomyces* [17, 21]. Несмотря на то, что эти роды дрожжей охватывают множество видов, лишь немногие из них способны аккумулировать значительные концентрации данных каротиноидов. Учитывая эффективность биосинтеза, основными продуктами этих двух соединений считаются дрожжи родов *Rhodotorula*, *Sporidiobolus* и *Sporobolomyces*. В зависимости от концентрации пигментов цвет колоний дрожжей варьируется от розового до красного оттенка [22].

Экспериментальные исследования позволили выявить их физиологические и биохимические функции. Исследования Сакаки [7] показали, что по сравнению с β -каротином торулародин, выделенный из *R. glutinis*, демонстрирует более выраженную способность к нейтрализации пероксильных радикалов. Более того, его антиоксидантный эффект превосходит действие α -токоферола [6]. Исследования Молин [2, 8] фотозащитных свойств каротиноидов показали, что накопление торулародина в клетках является ключевым этапом, обеспечивающим устойчивость дрожжей к воздействию УФ-В-излучения. Предполагается, что каротиноиды могут быть вовлечены в модуляцию проницаемости мембран, что способствует усилению клеточной защиты от окислительного стресса и радиационного повреждения [9].

Ранее в исследованиях авторами была определена способность синтезировать каротиноиды у психротолерантных дрожжей родов *Rhodotorula*, *Sporobolomyces* и *Cystobasidium*, что приводило к окрашиванию колоний дрожжей в кораллово-красный, светло-розовый или оранжевый цвета [23, 24].

Целью данного исследования являлось определение влияния температуры на профиль синтезируемых пигментов дрожжами, а также связь между составом пигментов и устойчивостью дрожжей к УФ-излучению.

Материалы и методы

Штаммы дрожжей. *Rhodotorula glutinis* БИМ Y-375, *Rh. glutinis* БИМ Y-376, *Rh. glutinis* БИМ Y-369,

Sporobolomyces phaffii БИМ Y-378, *Sp. phaffii* БИМ Y-367, *Sp. phaffii* БИМ Y-374, *Sp. phaffii* БИМ Y-370, *Sp. phaffii* БИМ Y-371, *Sp. phaffii* БИМ Y-372, *Cystobasidium ritchiei* БИМ Y-366, *C. ritchiei* БИМ Y-368. Дрожжи были выделены [26] из образцов мелкозёма Восточной Антарктиды, собранных на территории Земли Эндерби, станции Молодежная, полевой базе Гора Вечерняя, а также гор Принс-Чарльз [25, 27].

Культивирование дрожжей. Штаммы дрожжей были инокулированы в бульонную среду Сабуро (30 мл) в колбы Эрленмейера при аэрации 140 об/мин до достижения стационарной фазы роста при температуре 18 °С.

Устойчивость к УФ-излучению. Штаммы дрожжей, достигшие стационарной фазы роста, разводили до получения изолированных колоний на агаре Сабуро (КОЕ $\sim 1-5 \cdot 10^9$ кл/мл) и подвергали облучению ультрафиолетом используя УФ-лампы с длиной волны 253,7 нм на расстоянии 20 см. Облучение проводили с интервалом в 1 минуту.

Экстракция каротиноидов. С целью идентификации продуцируемых пигментов и обеспечения максимального выхода биомассы дрожжевых клеток, всю накопленную биомассу отделяли от культуральной жидкости, промывали и подвергали анализу пигментного состава. Извлечение пигментов проводили кислотным методом [28] с использованием 96 % этилового спирта.

Спектрофотометрический анализ каротиноидов. Измерения поглощения экстрактов проводили в видимом диапазоне длин волн с применением спектрофотометра Solar PV 1251С. Количество пигментов рассчитывали по величине максимума поглощения с использованием уравнения Келли и Хармона [3, 29]. Типичной характеристикой каротиноидов является наличие трех пиков поглощения в видимом спектре [3, 6].

Результаты и их обсуждение

В предварительных исследованиях было определено, что психротолерантные дрожжи родов *Rhodotorula*,

Sporobolomyces и *Cystobasidium*, выделенные из образцов почв Восточной Антарктиды, способны синтезировать комплексы пигментов, включающие торулен, торулародин, ζ -каротин, γ -каротин и δ -каротин в различных соотношениях. Более того установлено, что источник углевода влияет на количество и спектр синтезируемых пигментов [23, 24].

Исследование влияния температуры культивирования на рост и синтез пигментов дрожжами позволит выявить оптимальные условия синтеза пигментов для каждого исследуемого штамма.

Результаты гравиметрических исследований зависимости роста психротолерантных дрожжей от температуры культивирования показали, что оптимальная температура для накопления влажной биомассы у штаммов *Sporobolomyces phaffii* является 22 °С (см. рисунок 2 А). Максимальный выход биомассы при данной температуре был зафиксирован у штамма *Sp. phaffii* БИМ Y-371 и составил $2,119 \pm 0,015$ г. При снижении температуры культивирования до 18 °С выход биомассы снижался от 9,8 % (у штамма *Sp. phaffii* БИМ Y-367) до 26,5 % (у штамма *Sp. phaffii* БИМ Y-371) и составлял $1,61 \pm 0,02$ г и $1,56 \pm 0,01$ г

соответственно. Повышение температуры культивирования до 28 °С приводило к значительному уменьшению метаболической активности дрожжей вплоть до её полного отсутствия (штамм *Sp. phaffii* БИМ Y-374 не рос при данной температуре).

Гравиметрические исследования особенностей роста дрожжей родов *Rhodotorula* и *Cystobasidium* не имели идентичных закономерностей, что свидетельствовало о наличии отличных метаболических аспектов развития штаммов внутри одного рода/вида (см. рисунок 2 Б и 2 В). При этом максимальный выход биомассы у представителей рода *Rhodotorula* был зафиксирован при 22 °С у *Rh. glutinis* БИМ Y-375 и составлял $2,28 \pm 0,03$ г. В то же время дрожжи рода *Cystobasidium* проявили меньшую метаболическую активность и наибольшее значение влажной биомассы было определено при 18 °С у *C. ritchiei* БИМ Y-368 — $1,23 \pm 0,01$ г.

Спектрофотометрический анализ пигментов

Биомассу исследуемых дрожжей подвергали кислотному гидролизу с последующей экстракцией пигментов с использованием этилового спирта. По данным спек-

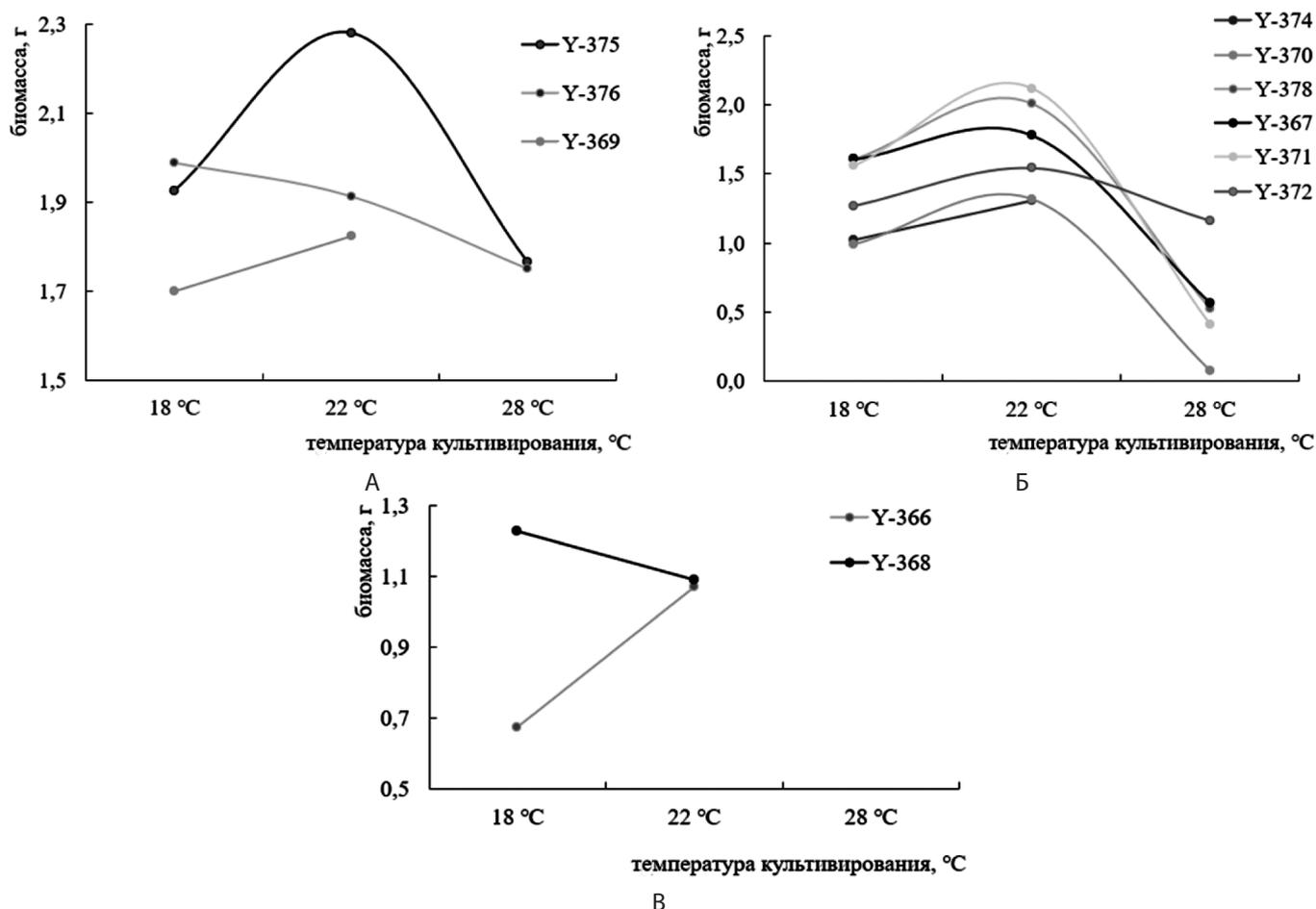
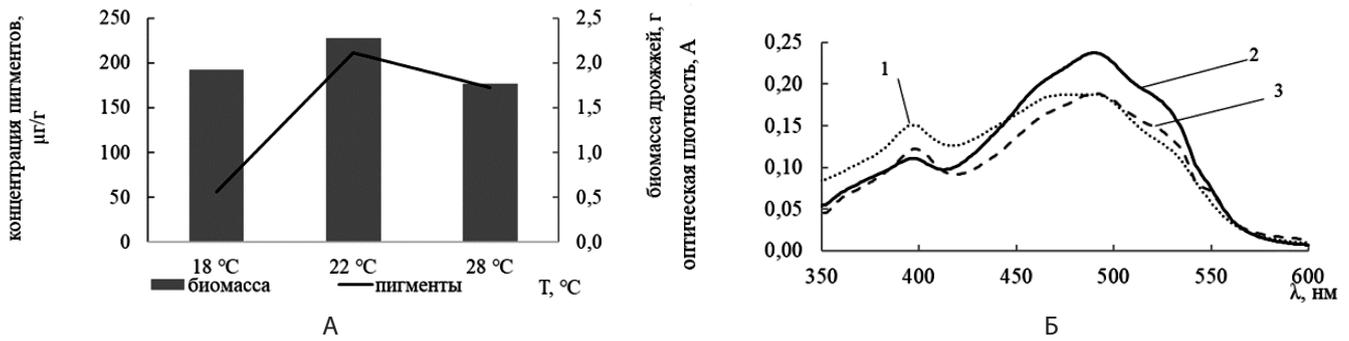


Рис. 2. Гравиметрические исследования роста дрожжей родов *Sporobolomyces* (А), *Rhodotorula* (Б) и *Cystobasidium* (В) при различных температурах культивирования



А — гравиметрические исследования синтеза биомассы и суммарного выхода каротиноидных пигментов от температуры культивирования; Б — спектрофотометрические исследования состава каротиноидов: 1 (18 °C), 2 (22 °C), 3 (28 °C)

Рис. 3. Результаты исследований роста и пигмент образования каротиноидов на примере штамма *Rh. glutinis* БИМ Y-375

трофотометрической идентификации пигментов, представители рода *Rhodotorula* способны синтезировать преимущественно либо комплекс ζ-каротин и торулародин, либо комплекс ζ-каротин и торулен (см. таблицу 1).

Штаммы *Rh. glutinis* БИМ Y-375 и *Rh. glutinis* БИМ Y-376, синтезирующие комплекс ζ-каротин и торулародин, способны расти во всем исследуемом диапазоне температур, при этом наибольший суммарный выход пигментов наблюдался при 22 °C и составлял 211,6 и 236,5 мкг/г соответственно (см. рисунок 3 Б). Необходимо подчеркнуть, что данные гравиметрических исследований показали прямую зависимость между объемом извлекаемых пигментов и количеством дрожжевой биомассы (см. рисунок 3 А). Рост и синтез пигментов штамма *Rh. glutinis* БИМ Y-369 отличались более узким температурным диапазоном. Оптимум для синтеза пигментов был смещен в сторону 18 °C.

Представители рода *Sporobolomyces* способны синтезировать преимущественно торулен и ζ-каротин при 22 °C. В свою очередь при 18 °C спектр синтезируемых пигментов становился шире: преимущественно торулен и ζ-каротин, реже ζ-каротин и β-каротин, и только у штаммов *Sp. phaffii* БИМ Y-370 и *Sp. phaffii* БИМ Y-372 выявлен комплекс ζ-каротин и γ-каротин. У штаммов *Sp. phaffii* БИМ Y-378, *Sp. phaffii* БИМ Y-367, *Sp. phaffii* БИМ Y-371 с температурным диапазоном роста 18–28 °C наибольший выход пигментов был определен при 28 °C. В то же время результаты гравиметрических исследований прироста биомассы показали, что рост при 28 °C приводит к формированию наименьшего количества биомассы в исследуемом диапазоне температур. У штаммов *Sp. phaffii* БИМ Y-374 и *Sp. phaffii* БИМ Y-370, с возможностью роста в диапазоне температур 18–22 °C, оптимальная температура для синтеза пигментов была смещена в сторону 18 °C, в то время как выход биомассы был выше при 22 °C на 21,8 % и 24,7 % соответственно.

Среди представителей рода *Sporobolomyces* следует выделить штамм *Sp. phaffii* БИМ Y-372, который в ходе

роста синтезировал только каротины, в то время как синтез торулена или торулародина не наблюдалось. Оптимальная температура для прироста биомассы и синтеза пигментов была смещена в сторону 22 °C, что также отличалось от остальных исследуемых представителей данного рода. Состав синтезированных пигментов окрашивал колонии в оттенки светло-розового цвета. В то время как у остальных исследуемых представителей рода *Sporobolomyces* наблюдалось изменение пигмента колоний в различные оттенки кораллового и кораллового-оранжевого цвета.

Представители рода *Cystobasidium* способны синтезировать комплекс δ-каротин и ζ-каротин при 18 °C культивирования, и при повышении температуры до 22 °C наблюдали формирование торулена и ζ-каротина. Синтез каротинов в близких по значениям концентрациях приводило к формированию оранжевого пигмента, в то время как наличие торулена обеспечивало окрашивание края колонии в розовом оттенке. Наибольший выход пигментов, и биомассы клеток наблюдался при 22 °C.

В ходе исследования **наибольший выход** ζ-каротина и торулена был выявлен у *Sp. phaffii* БИМ Y-374 и составил 119,3±0,95 мкг/г и 198,7±1,59 мкг/г соответственно. Наибольший выход торулародина определен у *Rh. glutinis* БИМ Y-376 и составил 175,9±1,23 мкг/г, β-каротина — 133,1±1,10 мкг/г у *Sp. phaffii* БИМ Y-371, δ-каротина — 63,9±0,45 мкг/г у *C. ritchiei* БИМ Y-368, γ-каротина — 122,6±0,86 мкг/г у *Sp. phaffii* БИМ Y-370. Что позволяет рассматривать их как перспективных продуцентов данных соединений.

Устойчивость к УФ-излучению

Согласно результатам идентификации каротиноидов в диапазоне температур от 18 °C до 28 °C, наибольшее разнообразие синтезируемых комплексов пигментов было определено при 18 °C. Дальнейшие исследования влияния состава пигментов на устойчивость к УФ-излучению велись при указанной температуре культивирования.

Таблица 1.

Влияние температуры культивирования на синтез каротиноидов

штаммы	18 °С		22 °С		28 °С	
	пигмент	С, мкг/г	пигмент	С, мкг/г	пигмент	С, мкг/г
<i>Rh. glutinis</i> БИМ У-375	ζ-каротин	21,4±0,24	ζ-каротин	56,2±0,51	ζ-каротин	56,9±0,45
	торулародин	34,4±0,41	торулародин	155,4±1,39	торулародин	115,5±1,04
<i>Rh. glutinis</i> БИМ У-376	ζ-каротин	29,4,4±0,69	ζ-каротин	60,6±0,58	ζ-каротин	50,6±0,35
	торулародин	83,3±2,12	торулародин	175,9±1,23	торулародин	113,0±0,90
<i>Rh. glutinis</i> БИМ У-369	ζ-каротин	77,6±0,85	ζ-каротин	68,7±0,55	–	–
	торулен	139,5±1,26	торулен	135,0±1,08	–	–
<i>Sp. phaffii</i> БИМ У-374	ζ-каротин	119,3±0,95	ζ-каротин	116,6±1,05	–	–
	торулен	198,7±1,59	торулен	147,7±1,34	–	–
<i>Sp. phaffii</i> БИМ У-370	ζ-каротин	108,3±0,76	ζ-каротин	72,5±0,07	–	–
	γ-каротин	122,6±0,86	торулен	85,3±0,59	–	–
<i>Sp. phaffii</i> БИМ У-378	ζ-каротин	64,3±0,58	ζ-каротин	70,0±0,56	ζ-каротин	107,0±0,85
	торулен	92,2±0,74	торулен	113,7±0,79	торулен	154,0±1,38
<i>Sp. phaffii</i> БИМ У-367	ζ-каротин	71,0±0,64	ζ-каротин	67,1±0,54	ζ-каротин	97,6±0,78
	торулен	113,9±1,03	торулен	122,6±0,98	торулен	137,8±0,96
<i>Sp. phaffii</i> БИМ У-371	ζ-каротин	84,8±0,68	ζ-каротин	60,5±0,42	ζ-каротин	99,5±0,89
	β-каротин	131,4±1,05	торулен	103,7±0,83	β-каротин	133,1±1,10
<i>Sp. phaffii</i> БИМ У-372	ζ-каротин	44,2±0,35	ζ-каротин	51,8±0,46	ζ-каротин	48,0±0,33
	β-каротин	34,1±0,27	γ-каротин	62,5±0,56	β-каротин	26,6±0,19
<i>C. ritchiei</i> БИМ У-366	ζ-каротин	35,3±0,25	ζ-каротин	89,1±0,80	–	–
	δ-каротин	45,2±0,36	торулен	113,4±0,91	–	–
<i>C. ritchiei</i> БИМ У-368	ζ-каротин	74,6±0,59	ζ-каротин	88,6±0,54	–	–
	δ-каротин	63,9±0,45	торулен	110,8±0,99	–	–

Примечание: «С» — концентрация пигмента, «-» — отсутствие роста и синтеза пигментов.

В ходе исследования облучению подвергались штаммы дрожжей достигшие стационарной фазы роста. Разведение культуры до оптимальных значений КОЕ (~ 1–5*10⁹ кл/мл) позволяло избежать наслоения клеток друг на друга и получения недостоверных результатов устойчивости к излучению.

Исследование показало, что увеличение времени облучения исследуемых штаммов психротолерантных дрожжей родов *Rhodotorula*, *Sporobolomyces*, *Cystobasidium* приводило к уменьшению их выживаемости (см. таблицу 2).

Следует отметить, что наибольшая устойчивость к УФ-излучению была выявлена у штаммов рода *Rhodotorula*,

синтезирующих комплекс каротиноидов ζ-каротин и торулен в соотношении 1:1,8 (*Rh. glutinis* БИМ У-369), что обеспечивало сохранение жизнеспособности штаммов вплоть до 6 минут облучения. Представители этого рода также синтезировали комплекс ζ-каротин и торулародин в соотношении 1:1,6 (*Rh. glutinis* БИМ У-375) и 1:2,8 (*Rh. glutinis* БИМ У-376), при этом увеличение синтеза торулародина обеспечивало сохранение жизнеспособности дрожжей на более высоких показателях выживаемости вплоть до 4 минут облучения УФ.

Штамм *Sp. phaffii* БИМ У-372 синтезировал комплекс ζ-каротин и β-каротин в соотношении 1,3:1, что обеспечивало выживаемость 62,7 % популяции при 1 минуте

Таблица 2.

Изменение выживаемости дрожжей при увеличении времени облучения УФ-излучением

штаммы	18 °С		Соотношение пигментов	время облучения, мин						
	пигмент	C, мкг/г		1	2	3	4	5	6	7
<i>Rh. glutinis</i> БИМ У-369	ζ-каротин	77,6±0,85	1	130,0	9,4	4,2	2,8	2,3	1,2	0,2
	торулен	139,5±1,26	1,8							
<i>Rh. glutinis</i> БИМ У-375	ζ-каротин	21,4±0,24	1	90,6	54,6	15,3	1,1	0,6	0,0	0,0
	торулародин	34,4±0,41	1,6							
<i>Rh. glutinis</i> БИМ У-376	ζ-каротин	29,4,4±0,69	1	66,7	20,9	2,3	1,2	0,9	0,9	0,06
	торулародин	83,3±2,12	2,8							
<i>Sp. phaffii</i> БИМ У-372	ζ-каротин	44,2±0,35	1,3	62,7	13,8	7,6	5,4	1,9	0,1	0,1
	β-каротин	34,1±0,27	1							
<i>Sp. phaffii</i> БИМ У-367	ζ-каротин	71,0±0,64	1	61,8	1,4	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	торулен	113,9±1,03	1,6							
<i>Sp. phaffii</i> БИМ У-370	ζ-каротин	108,3±0,76	1	42,9	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	γ-каротин	122,6±0,86	1,1							
<i>Sp. phaffii</i> БИМ У-371	ζ-каротин	84,8±0,68	1	24,4	1,5	0,9	0,8	0,7	0,1	0,0
	β-каротин	131,4±1,05	1,6							
<i>Sp. phaffii</i> БИМ У-378	ζ-каротин	64,3±0,58	1	9,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1
	торулен	92,2±0,74	1,4							
<i>Sp. phaffii</i> БИМ У-374	ζ-каротин	119,3±0,95	1	5,6	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	торулен	198,7±1,59	1,7							
<i>C. ritchiei</i> БИМ У-368	ζ-каротин	74,6±0,59	1,2	10,8	6,1	3,3	1,4	0,2	0,0	0,0
	δ-каротин	63,9±0,45	1							
<i>C. ritchiei</i> БИМ У-366	ζ-каротин	35,3±0,25	1	6,7	5,3	2,2	1,6	0,1	0,0	0,0
	δ-каротин	45,2±0,36	1,3							

Примечание: значения выживаемости дрожжей выражены в процентах в расчете от контрольного значения КОЕ (кл/мл)

облучения и постепенного снижения численности популяции до 1,9 % при 5 минутах облучения.

Штаммы рода *Cystobasidium*, синтезирующие комплекс каротинов, проявили среднюю устойчивость к воздействию УФ-излучения, с сохранением только 10,8 % и 6,7 % популяции при 1 минуте облучения, но сохраняли минимальные показатели выживаемости вплоть до 4 минут экспозиции УФ.

Следует также отметить, что прямой зависимости между количеством синтезируемых пигментов и устойчивости от УФ-излучению выявлено не было, что может свидетельствовать о том, что не только каротиноидные

пигменты обеспечивают защиту клеток от пагубного воздействия стрессового фактора. В ходе последующих исследований планируется выявление дополнительных структур и комплексов, способствующих выживанию психротолерантных штаммов дрожжей в условиях ультрафиолетового излучения.

Заключения

Таким образом, селективное поглощение света в видимом спектре остается важным диагностическим средством для определения каротиноидных соединений посредством спектрофотометрии в ультрафиолетовом и видимом диапазонах. В свою очередь, психротолер-

рантные дрожжи Восточной Антарктиды, способны продуцировать разнообразные каротиноидные пигменты: торулен, торулародин и различные формы каротинов.

Экспериментально установлено, что дрожжи рода *Rhodotorula* синтезируют преимущественно комплексы ζ -каротина с торулародином или торуленом. Дрожжи родов *Sporobolomyces* и *Cystobasidium* формируют различные сочетания каротинов или каротинов в комплексе с торуленом при разных температурах культивирования.

Максимальная стойкость к ультрафиолетовому излучению была определена у штаммов рода *Rhodotorula*,

которые продуцировали ζ -каротин и торулен в соотношении 1:1,8, что придаёт этим микроорганизмам возможность сохранять жизнеспособность при экспозиции УФ до 6 минут. Синтез торулародина обеспечивал стабильность на несколько меньших временных интервалах облучения, но с сохранением более высоких показателей выживаемости.

Эти данные подчёркивают важность состава каротиноидных комплексов в адаптации микробных культур к экстремальным условиям окружающей среды и служат существенным критерием для дальнейших исследований в области микробной биохимии и биотехнологии.

ЛИТЕРАТУРА

- Herz S. Intermediates in the oxidative pathway from torulene to torularhodin in the red yeasts *Cystofilobasidium infirmominatum* and *C. capitatum* (Heterobasidiomycetes, Fungi) / S. Herz [et al] // *Phytochemistry*. — 2007. — V. 68, №. 20. — P. 2503–2511.
- Moliné M. Photoprotection by carotenoid pigments in the yeast *Rhodotorula mucilaginosa*: the role of torularhodin / M. Moliné M. [et al] // *Photochemical & Photobiological Sciences*. — 2010. — V. 9, №. 8. — P. 1145–1151.
- Maldonado I.R. Carotenoids of yeasts isolated from the Brazilian ecosystem / I.R. Maldonado, D.B. Rodriguez-Amaya, A.R.P. Scamparini // *Food Chemistry*. — 2008. — V. 107, №. 1. — P. 145–150.
- Peterson W.J. A procedure for demonstrating the presence of carotenoid pigments in yeasts / W.J. Peterson [et al] // *Journal of Bacteriology*. — 1954. — V. 67, №. 6. — P. 708–713.
- Bonner J. Changes in polyene synthesis induced by mutation in a red yeast (*Rhodotorula rubra*). / J. Bonner, A. Sandoval, Y. W. Tang [et al] // *Arch Biochem*. — 1946. — V. 10. — P. 113–23.
- Sakaki H. Torularhodin as a potent scavenger against peroxy radicals isolated from a soil yeast, *Rhodotorula glutinis*. / H. Sakaki, T. Nakanishi, S. Komemushi [et al] // *Journal of clinical biochemistry and nutrition*. — 2001. — V. 30. — P. 1–10.
- Sakaki H. Effect of active oxygen species on the productivity of torularhodin by *Rhodotorula glutinis* No. 21. / H. Sakaki, H. Nochide, S. Komemushi [et al] // *Journal of bioscience and bioengineering*. — 2002. — V. 93, №. 3. — P. 338–340.
- Moliné M. Photoprotective role of carotenoids in yeasts: response to UV-B of pigmented and naturally occurring albino strains. / M. Moliné, D. Libkind, M.C. Diéguez [et al] // *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. — 2009. — V. 95, №. 3. — P. 156–161.
- Moliné M. Production of pigments and photo-protective compounds by cold-adapted yeasts. In: Buzzini P, Margesin R, editors. / M. Moliné, D. Libkind, V. Garcia [et al] // *Cold-adapted yeasts: biodiversity, adaptation strategies and biotechnological significance*. — Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. — 2013. — P. 193–224.
- Kot A.M. *Rhodotorula glutinis*—potential source of lipids, carotenoids, and enzymes for use in industries / A.M. Kot, S. Błazejak, A. Kurcz [et al] // *Applied microbiology and biotechnology*. — 2016. — V. 100. — P. 6103–6117.
- Kot A.M. Torulene and torularhodin: “new” fungal carotenoids for industry? / A.M. Kot [et al] // *Microbial Cell Factories*. — 2018. — V. 17. — P. 1–14.
- Madhour A. Biosynthesis of the xanthophyll plectanixanthin as a stress response in the red yeast *Dioszegia* (Tremellales, Heterobasidiomycetes, Fungi) / A. Madhour, H. Anke, A. Mucci [et al] // *Phytochemistry*. — 2005. — V. 66, №. 22. — P. 2617–2626.
- Villarreal P. Tolerance to ultraviolet radiation of psychrotolerant yeasts and analysis of their carotenoid, mycosporine, and ergosterol content / P. Villarreal, M. Carrasco, S. Barahona [et al] // *Current Microbiology*. — 2016. — V. 72. — P. 94–101.
- Hausmann A. A single five-step desaturase is involved in the carotenoid biosynthesis pathway to β -carotene and torulene in *Neurospora crassa* / A. Hausmann, G. Sandmann // *Fungal Genetics and Biology*. — 2000. — V. 30, №. 2. — P. 147–153.
- Lee J.J. Engineering *Rhodospiridium toruloides* with a membrane transporter facilitates production and separation of carotenoids and lipids in a bi-phasic culture / J.J. Lee, L. Chen, B. Cao [et al] // *Applied Microbiology and Biotechnology*. — 2016. — V. 100. — P. 869–877.
- Li C. Increased torulene accumulation in red yeast *Sporidiobolus pararoseus* NGR as stress response to high salt conditions / C. Li, N. Zhang, B. Li [et al] // *Food Chemistry*. — 2017. — V. 237. — P. 1041–1047.
- Dimitrova S. Production of metabolites with antioxidant and emulsifying properties by Antarctic strain *Sporobolomyces salmonicolor* AL1 / S. Dimitrova, K. Pavlova, L. Lukanov [et al] // *Applied biochemistry and biotechnology*. — 2013. — V. 169. — P. 301–311.
- Sakaki H. Activation of torularhodin production by *Rhodotorula glutinis* using weak white light irradiation / H. Sakaki, T. Nakanishi, A. Tada [et al] // *Journal of bioscience and bioengineering*. — 2001. — V. 92, №. 3. — P. 294–297.
- Sperstad S. Torularhodin and torulene are the major contributors to the carotenoid pool of marine *Rhodospiridium babjevae* (Golubev) / S. Sperstad, B.F. Lutnaes, S.K. Stormo [et al] // *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. — 2006. — T. 33, №. 4. — P. 269–273.
- Du C. Torularhodin, isolated from *Sporidiobolus pararoseus*, inhibits human prostate cancer LNCaP and PC-3 cell growth through Bcl-2/Bax mediated apoptosis and AR down regulation / C. Du, Y. Li, Y. Guo [et al] // *RSC Advances*. — 2015. — V. 5, №. 129. — P. 106387–106395.

21. Razavi S.H. Effect of temperature and pH on the growth kinetics and carotenoid production by *Sporobolomyces ruberrimus* H110 using technical glycerol as carbon source / S.H. Razavi, I. Marc // Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE). — 2006. — V. 25, №. 3. — P. 59–64.
22. Zoz L. Torularhodin and torulene: bioproduction, properties and prospective applications in food and cosmetics—a review / L. Zoz, J.C. Carvalho, V.T. Soccol [et al] // Brazilian Archives of Biology and Technology. — 2014. — V. 58, №. 2. — P. 278–288.
23. Griбанова E.A. Effect of carbohydrate source on the synthesis of carotenoid pigments by psychrotolerant yeasts *Rhodotorula*, *Sporobolomyces* and *Cystobasidium* / E.A. Griбанова // «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration». Scientific publishing house Infinity, 2025. — P. 134–142.
24. Грибанова E.A. Спектрофотометрическое определение каротиноидных пигментов в клетках психротолерантных дрожжей / E.A. Грибанова, Косило А.Ю. // New trends in science, society and technology: Collection of articles II International Scientific and Practical Conference. — Melbourne: ICSRD «Scientific View». — 2025. — P. 5–18.
25. Griбанова E. Diversity and biotechnological potential of yeasts isolated from different ecosystems of East Antarctica / E. Griбанова, V. Miamin // Modern mycology in Russia. — 2024. — №. 10. — P. 55–58.
26. Griбанова E. Physiological and biochemical traits of yeasts from soils of various ecosystems of East Antarctica / E. Griбанова, V. Miamin // Ukrainian Antarctic Journal. — 2021. — №. 2. — P. 106–116.
27. Griбанова E. Spectrophotometric determination of carotenoid pigments in psychrotolerant yeast cells / E. Griбанова, A. Kosilo // New trends in science, society, and technology: collection of articles II International Scientific and Practical Conference. — Melbourne: ICSRD «Scientific View». — 2025. — P. 5–18.
28. Holzapfel N. The Potential role of lycopene for the prevention and therapy of prostate cancer: from molecular mechanisms to clinical evidence // International Journal of Molecular Sciences. — 2013. — №. 7. — P. 14620–14646.
29. Schmidt I. Biotechnological production of astaxanthin with *Phaffia rhodozyma* / *Xanthophyllomyces dendrorhous* // Applied Microbiology and Biotechnology. — 2011. — №. 3. — P. 555–571.

© Грибанова Екатерина Александровна (lika-den98@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СНИЖЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ОТ КИСЛЫХ ДРЕНАЖНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОНИЦАЕМЫХ РЕАКЦИОННЫХ БАРЬЕРОВ¹

REDUCING THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF ACID MINE DRAINAGE USING PERMEABLE REACTIVE BARRIERS

**N. Rastanina
I. Galanina
A. Perfiliev**

Summary. The paper examines state-of-the-art methods for the treatment of acid mine drainage (AMD) from mining operations, with a particular focus on permeable reactive barriers (PRBs) as a cost-effective and environmentally sustainable alternative to conventional technologies. The advantages of PRBs over traditional methods are analyzed, including their economic feasibility and the potential for utilizing industrial waste as sorbent materials. The study confirms that reactive barriers made from readily available and recycled materials not only provide an effective solution for wastewater treatment but also support the reutilization of industrial waste — thus aligning with the principles of sustainable development and the circular economy.

Keywords: acid mine drainage, reactive barriers, heavy metals, sorption, mining industry, environmental safety.

Растанина Наталья Константиновна

Кандидат биологических наук, доцент, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск
n.rastanina@yandex.ru

Галанина Ирина Александровна

старший преподаватель, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск
000911@togudv.ru

Перфильев Александр Владимирович

Кандидат химических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Институт химии, Дальневосточное отделение, Российская академия наук, г. Владивосток
a.v.perfilev@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются современные методы очистки кислых дренажных вод горнодобывающих предприятий, особое внимание уделяется применению проницаемых реакционных барьеров как экономически эффективной и экологически безопасной альтернативе традиционным технологиям. Рассмотрены преимущества технологии проницаемых реакционных барьеров по сравнению с традиционными методами, включая экономическую эффективность и возможность использования промышленных отходов в качестве сорбционных материалов. Исследование подтверждает, что применение реакционных барьеров на основе доступных и вторичных материалов способствует не только решению проблемы очистки сточных вод, но и утилизации промышленных отходов, что соответствует принципам устойчивого развития и циркулярной экономики.

Ключевые слова: кислые дренажные воды, реакционные барьеры, тяжелые металлы, сорбция, горнодобывающая промышленность, экологическая безопасность.

Минимизация негативного воздействия промышленных стоков на природные экосистемы при одновременной организации их ресурсоэффективной переработки является важнейшим условием обеспечения экологической безопасности и рационального использования сырьевых ресурсов. Состояние водной среды выступает критически важным фактором при разработке управленческих решений и внедрении принципов устойчивого природопользования.

Современные системы очистки сточных вод и изоляции токсичных отходов (как твердых, так и жидких) обычно сопряжены с высокими капитальными вложе-

ниями, а также значительными энергетическими и материальными затратами в процессе эксплуатации. В связи с этим актуальной становится задача снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду с применением экономически эффективных методов. В современных природоохранных практиках наблюдается устойчивая тенденция к применению реакционных барьеров, способных в определенных условиях заменить капиталоемкие очистные комплексы и иные затратные экологические технологии. На основе концепции реакционных барьеров можно определить стратегический подход к минимизации загрязнения окружающей среды. Наиболее оптимальными являются методы, направленные

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 24-27-20085 <https://rscf.ru/project/24-27-20085/> и Министерства образования и науки Хабаровского края (Соглашение № 121С/2024).

на ускорение естественного преобразования загрязняющих веществ в безопасные формы или их локализацию в строго ограниченных зонах литосферы — то есть создание искусственных геохимических барьеров.

Применение реакционных барьеров обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными технологиями. В частности, такой подход более экологичен, поскольку моделирует естественные геохимические процессы. Материалами для барьеров могут служить как природные компоненты (почвы, горные породы), так и производственные отходы, что снижает затраты на природоохранные мероприятия.

Особый интерес представляет использование промышленных отходов для создания барьеров. Это не только экономически выгодно, но и способствует решению еще одной экологической проблемы — утилизации отходов.

Горнодобывающая промышленность генерирует значительные объемы отходов в форме пустой породы, хвостов и шлака (рис. 1).

Пустая порода — это нерентабельная порода, которую необходимо добывать и извлекать для доступа к минерализованному рудному телу (или месторождению). Чаще всего она образуется в больших объемах при открытых работах, и в меньших количествах при проведении работ для доступа к минерализованным зонам в подземных шахтах.

Хвосты представляют собой частицы измельченной породы, из которых на концентрате была извлечена коммерческая ценность. Они характеризуются относительно однородным распределением размеров частиц и считаются однородными материалами [2].

Методы управления для каждой категории отходов различаются. Пустые породы обычно складированы на поверхности в виде отвалов, если они не используются повторно для заделки шахт. Хвосты обычно складированы в виде пульпы с начальным содержанием твердых компонентов от 25 % до 45 %, которые оседают со временем. Хвосты транспортируются из концентрата в специальную зону, называемую хвостохранилищем, где они складированы. Эта зона частично или полностью окружена дамбами, которые удерживают как твердую фазу, так и жидкие стоки [3].

Горнодобывающие предприятия генерируют сточные воды на всех стадиях технологического цикла — от добычи до переработки минерального сырья. В зависимости от источника формирования и характера образования, данные техногенные воды классифицируются на четыре основные группы [4] (табл. 1).

Влияние кислых дренажных вод на экосистемы классифицируется по четырем направлениям [5]:

- химическое — ацидификация и металлизация сред;
- физическое — изменение оптических характеристик;
- биологическое — токсикологическое воздействие на организмы;
- экологическое — структурные изменения биоценозов.

Кислые дренажные воды образуются в горнодобывающих районах и вокруг них. Обычно это заброшенные и действующие шахты, при добыче открытым способом или при подземных работах [6]. Вторичные источники кислых дренажных вод включают отвалы шахт, склады руды, отвалы пустой породы, дамбы хвостохранилищ, технологические дороги, карьеры, рудничные озера



Рис. 1. Операционный цикл горных работ и типология отходов горнодобывающей промышленности [адаптировано из 1]

Таблица 1.
Классификация техногенных вод горных предприятий

Группа	Подгруппа / Категория	Характеристика
1. Технологические сточные воды обогатительного передела	а) сточные воды основных процессов обогащения	Технологические хвосты (твердые и жидкие отходы процесса обогащения)
	б) сточные воды вспомогательных процессов обогащения	Сливы и фильтрат от сгущения и обезвоживания концентратов
	в) стоки мокрой газоочистки	Воды после очистки дымовых газов
	г) смывные стоки	Стоки от мытья полов, стен, охлаждения оборудования, гидрообеспыливания и др.
	— инфильтрационные стоки хвостохранилищ	Просачивающиеся воды из хвостохранилищ
2. Растворы технологических процессов	—	Жидкие отходы, образующиеся в ходе химических или гидрометаллургических процессов
3. Воды от атмосферных осадков	а) дождевые (ливневые) с промплощадок	Стоки, формируемые атмосферными осадками на промышленных территориях
	б) талые с промплощадок	Воды от таяния снега на промплощадках
	в) подотвальные воды	Воды, дренируемые из отвалов (пустой породы, забалансовых руд, отходов обогащения и металлургии, площадок складирования сырья)
4. Попутно-извлекаемые воды	а) карьерный водоотлив	Воды, откачиваемые из карьеров
	б) шахтный водоотлив	Воды, откачиваемые из шахт
	в) дренажные воды	Воды, собираемые дренажными системами

и шлакоотстойники [5]. Кислые дренажные воды из этих вторичных источников могут быть еще более агрессивными, вследствие таких факторов как размер частиц, площадь поверхности, аморфность и дезагрегация. Общее влияние кислых дренажных вод, однако, зависит от геоморфологии, климата и организации сети и расположения источника [7].

Очевидно, что кислые дренажные воды изменяют физико-химические характеристики водных объектов,

а также донных отложений, в частности pH, химический состав и цвет (рис. 2), так как любой сульфидсодержащий минерал может рассматриваться как потенциальный источник кислых дренажных вод.

Современные исследования в области горнодобывающей промышленности сосредоточены на изучении процессов окисления сульфидсодержащих отходов и механизмов миграции металлов в водных системах. Особое внимание уделяется анализу формирования антропогенных геохимических аномалий и трансформации форм нахождения металлов при взаимодействии с техногенно-измененными геологическими средами.

Практика обращения с металлосодержащими сточными водами на горнодобывающих предприятиях требует совершенствования, поскольку существующие технологии преимущественно предусматривают их перевод в сложные осадочные соединения с последующим захоронением. Актуальной задачей является разработка комплексных решений, сочетающих очистку сточных вод с извлечением ценных компонентов. Для этого необходимы четкие критерии оценки как экологических рисков, так и технологической целесообразности переработки конкретных водных потоков.

Эффективность очистных технологий напрямую зависит от понимания форм нахождения металлов в растворах. Современные методы обработки вод, основанные на традиционных подходах к фазовому разделению, требуют модернизации с учетом необходимости получения товарных металлосодержащих продуктов. При этом разработка принципиально новых методов очистки сталкивается со значительными технологическими сложностями, что делает более перспективным адаптацию существующих технологий к специфике конкретных производственных стоков.

Ключевым направлением развития отрасли является создание ресурсосберегающих технологий, позволяющих минимизировать экологическое воздействие при максимально полном извлечении полезных компонентов. Решение этой задачи требует комплексного подхода, учитывающего как экологические, так и экономические аспекты переработки промышленных сточных вод.

Среди инновационных решений по очистке кислых дренажных вод проницаемые реакционные барьеры привлекают значительное внимание. Их применение представляет собой многообещающее решение для смягчения последствий воздействия кислых дренажных вод, позволяя проводить пассивную очистку загрязненных территорий [8]. Такое пассивное восстановление является экономически приемлемым, поскольку требует меньше затрат на обслуживание, чем активные методы, а также эффективно с точки зрения удаления загрязне-

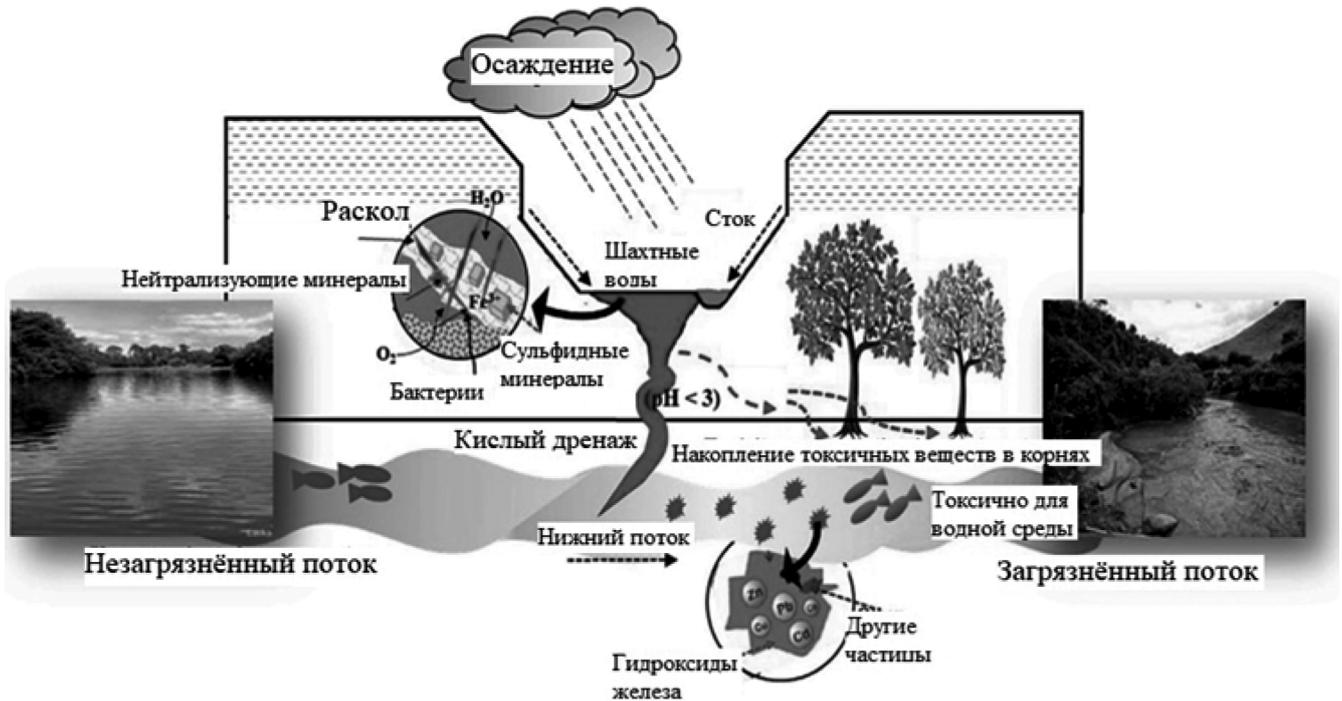


Рис. 2. Схема процесса образования кислых дренажных вод и загрязнения водных объектов [адаптировано из 17]

ний [9]. Работа проницаемого реакционного барьера обеспечивается путем установки проницаемого реагирующего материала на пути грунтовых вод (перпендикулярно направлению потока) в качестве реакционной среды для загрязняющих веществ. Барьер вступает в реакцию с загрязняющими веществами под действием гидравлического градиента и может трансформировать загрязняющие вещества в безвредные растворенные соединения или осадки, которые сорбируются на поверхности реакционного материала. С момента создания первого проницаемого реакционного барьера в 1991 году, к настоящему времени в мире создано более 200 барьеров [10]. Эти барьеры доказали свою эффективность в борьбе с разнообразным спектром загрязняющих веществ, включая галогенированные углеводороды, тяжелые металлы, нефтепродукты и др.

Применение проницаемых реакционных барьеров для контроля загрязнения объектов должно опираться на методику очистки кислых дренажных вод. Точная и эффективная конструкция проницаемого реакционного барьера требует правильного понимания нескольких факторов:

1. реакционная способность выбранного материала относительно загрязняющих веществ в кислых дренажных водах для достижения заданного значения времени задержания поверхностного стока, то есть, поставленной цели очистки;
2. химический состав подземных вод, включая неорганические и органические компоненты грунтовых вод;

3. долгосрочная стабильность и долговечность системы проницаемого реакционного барьера для работы в течение заданного периода;
4. гидравлические характеристики, обеспечивающие беспрепятственный поток грунтовых вод через барьер;
5. экологическая совместимость для минимизации образования потенциально вредных вторичных загрязнителей в процессе очистки.

Долгосрочный эффект применения проницаемого реакционного барьера во многом зависит от выбора подходящих реакционных сред для целевых загрязнений [11]. В зависимости от материала механизм действия барьера можно разделить на деградацию, осаждение, адсорбцию, соадсорбцию, соосаждение, ионный обмен и комплексообразование.

Проницаемый реакционный барьер обычно устанавливается после шлейфа загрязнения в перпендикулярном направлении потоку грунтовых вод. Проницаемые реакционные барьеры делятся на непрерывные реакционные системы, системы «воронка-затвор», инъектируемые реакционные системы, системы реакционного блока с пассивным сбором и новые, называемые пассивными, системы конвергенции в зависимости от типа конструкции (рис. 3).

Определение приемлемой технологии строительства проницаемого реакционного барьера также имеет решающее значение для его успешной работы и оптимизации общих затрат. Проницаемый реакционный барьер

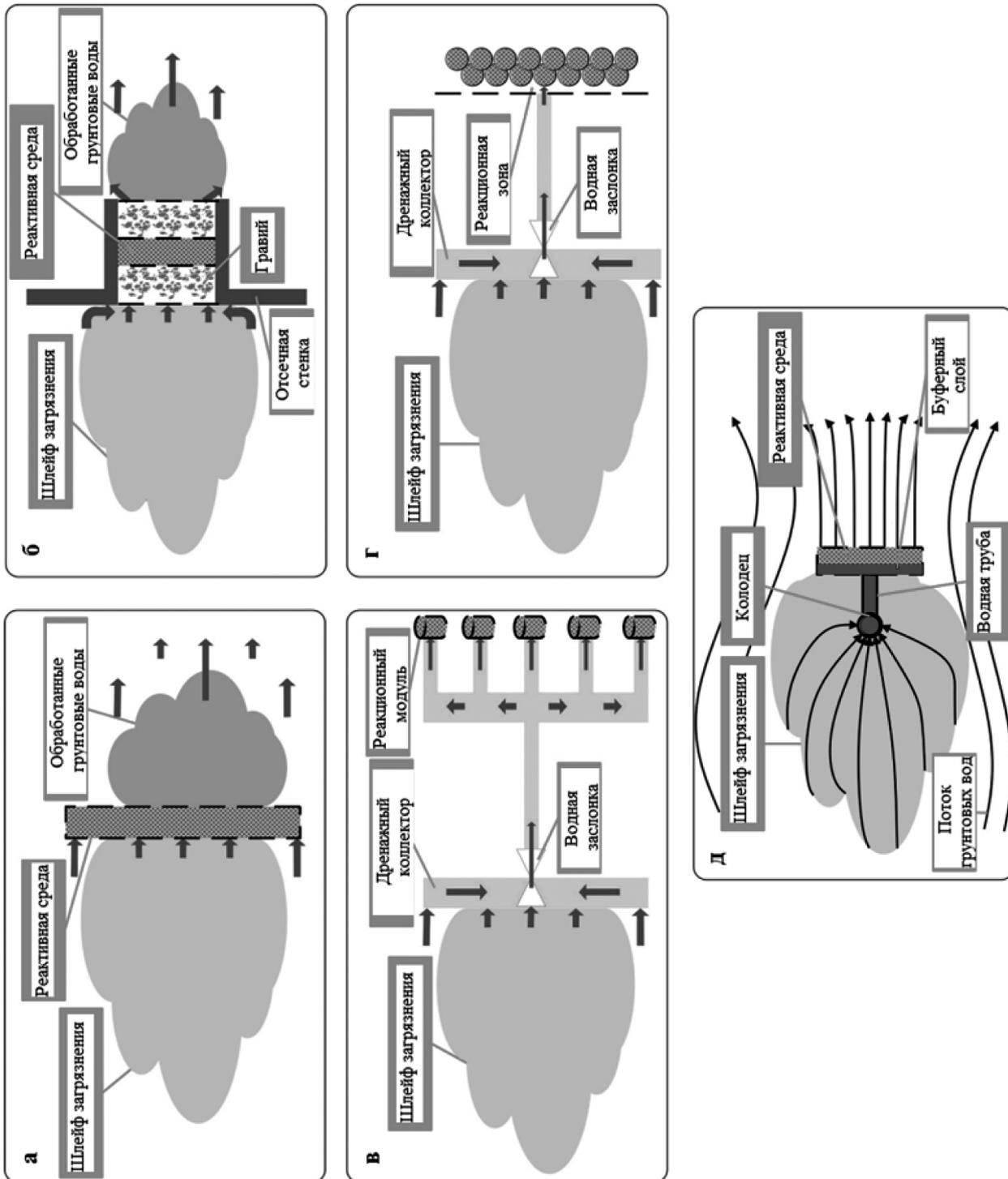


Рис. 3. Типы конструкций проницаемых реакционных барьеров
 (а — непрерывная реакционная система, б — система «воронка-затвор», в — инжецируемая реакционная система, г — система реакционного блока с пассивным сбором, д — система пассивной конвергенции) [адаптировано из 18]

обычно конструируется так, чтобы проникнуть в водоносный горизонт, водоупорный пласт и быть встроенным в водоупор на расстояние 0,5–1 м, но не за пределы водоупора. Существует два основных типа строительных технологий: с выемкой и без выемки грунта [12].

Проницаемые реакционные барьеры имеют много достоинств, но имеют и существенные недостатки. Траншеи в глубоких водоносных горизонтах непрактичны. В частности, они могут применяться для неглубоких шлейфов. Расколота порода или почва могут сформировать более предпочтительные пути потока вокруг барьера, делая его бесполезным. На поверхности барьера могут образовываться осадения в результате химических взаимодействий в зоне реакции, снижая его проницаемость и эффективность. Недостаточно эффективная очистка воды в случае большой концентрации или совместного действия анионов и катионов [8].

Для локализации кислых дренажных вод также применяют барьеры медленной проницаемости. В отличие от проницаемого реакционного барьера, барьер медленной проницаемости — это технология инженерного контроля, иногда называемая отсечной стенкой, стеной в грунте или вертикальным барьером, первоначально использовавшейся для предотвращения просачивания через фундаменты или плотины.

Российская горнодобывающая отрасль характеризуется значительными объемами отхообразованья — около 7 млрд тонн в год. При этом общий объем накопленных горнопромышленных отходов в различных типах хранилищ достигает 80 млрд тонн. [13].

С точки зрения применения техногенных отходов и продуктов на их основе в технологиях обработки кислых техногенных вод интерес представляют новые материалы, получаемые в результате переработки техногенного, рудного и нерудного сырья. Значительные объемы такого сырья образуются в процессе деятельности предприятий теплоэнергетики, металлургии и горно-обогатительных комбинатов [14–15].

Следует отметить, что перспективность применения, например пеносиликатов в качестве сорбционного материала для реакционных барьеров подтверждают и экспериментальные исследования.

В работе [19] качестве объектов исследования были отобраны образцы пеносиликата, полученные из отходов переработки слюдяного сланца по методике, описанной в научной литературе [16]. Образцы представляли собой легкие пористые гранулы фракцией 2–8 мм с преобладающим содержанием оксидов кальция, кремния и алюминия.

Оценка сорбционных свойств проводилась в условиях фильтрации многокомпонентных кислых сточных вод промышленного производства через слой пеносиликата в течение 120 часов.

Результаты показали максимальную эффективность извлечения ионов меди (98,6 %) и хрома (III) (35,6 %). Одновременно зафиксировано увеличение концентрации хлорид-ионов с 2,44 до 258,54 мг/л, что требует дополнительного изучения.

Таким образом, оптимизация технологических решений для переработки кислых дренажных вод горно-обогатительных комбинатов с одновременным извлечением тяжелых металлов представляет собой комплексную инженерно-экологическую задачу. Ее сложность обусловлена необходимостью комбинирования разнонаправленных методов очистки, что приводит к усложнению технологических схем.

Эффективная реализация сорбционных методов очистки требует применения специализированных сорбентов, обладающих следующими характеристиками:

- способность к селективному извлечению металлов из разбавленных растворов;
- устойчивость к высокому солевому фону;
- возможность генерации концентрированных элюатов для последующего металлургического передела.

Перспективным направлением является создание проницаемых реакционных барьеров, использующих:

- природные минеральные материалы (экономическая доступность, локальная сырьевая база);
- промышленные отходы (решение проблемы утилизации вторичных ресурсов).

Данный подход сочетает технологическую эффективность с экономической целесообразностью, обеспечивая: снижение капитальных затрат; минимизацию логистических расходов; комплексное решение экологических задач

Современные исследования ориентированы на получение новых материалов, обладающих такими преимуществами как повышенная адсорбционная емкость, повышенная селективность, более простые регенерация и восстановление, а также более экологически приемлемый и экономически эффективный процесс очистки загрязненных вод. Для максимизации эффективности процесса очистки кислых дренажных вод от ионов тяжелых металлов целесообразно использовать комбинацию традиционных и инновационных материалов. В этом случае индивидуальные преимущества каждого вида материала в совокупности могут обеспечить необходимые показатели обработки вод, а также увеличение срока службы реакционных загрузок и экономической эффективности процесса очистки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yassine Ait-Khouia, Mostafa Benzaazoua, Isabelle Demers Environmental desulfurization of mine wastes using various mineral processing techniques: Recent advances and opportunities. *Minerals Engineering* 174 (2021) 107225.
2. Amos R.T., Blowes D.W., Bailey B.L., Sege D.C., Smith L., Ritchie A.I.M. 2015. Waste-rock hydrogeology and geochemistry. *Applied geochemistry* 57, 140–156.
3. Bussi`ere B., 2007. Colloquium 2004: Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal* 44 (9), 1019–1052.
4. Орехова Н.Н. Научное обоснование и разработка технологии комплексной переработки и утилизации техногенных медно-цинковых вод горных предприятий: дис. . . . докт. техн. наук / ФГБОУ ВПО «Магнитогорск. гос. техн. ун-т». — Магнитогорск, 2014. — 388 с.
5. Gray N.F., 1997. Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. *Environ. Geol.* 30, 10. <https://doi.org/10.1177/026461969701500103>.
6. Udayabhanu S., Prasad B. 2010. Studies on environmental impact of acid mine drainage generation and its treatment: an appraisal. *IJEP* 30, 953–967.
7. Dold B., 2017. Acid rock drainage prediction: a critical review. *J. Geochem. Explor.* 172, 120–132.
8. Budania R., Dangayach S., 2023. A comprehensive review on permeable reactive barrier for the remediation of groundwater contamination. *J. Environ. Manag.* 332, 117343 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117343>.
9. Lorio C.T., Opiso E.M., Resabal V.J.T., Bernardo-Aruguay I., Ortenero J.R., Beltran A.B., Alorro R.D., Tabelin C.B., Orbecido A.H., Promentilla M.A.B. 2023. Optimal treatment technology selection for acid mine drainage via spherical fuzzy analytic hierarchy process. *Miner. Eng.* 202, 108260 <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108260>.
10. Singh R., Chakma S., Birke V. 2023. Performance of field-scale permeable reactive barriers: an overview on potentials and possible implications for in-situ groundwater remediation applications. *Sci. Total Environ.* 858, 158838 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158838>.
11. Torregrosa M., Schwarz A., Nancucheo I., Balladares E., 2019. Evaluation of the bioprotection mechanism in diffusive exchange permeable reactive barriers for the treatment of acid mine drainage. *Sci. Total Environ.* 655, 374–383. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.083>.
12. Bekele D.N., Naidu R., Birke V., Chadalavada S., 2015. Choosing the best design and construction technologies for permeable reactive barriers. In: *Permeable Reactive Barrier*. CRC Press.
13. Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П., Бурцев Л.И. Экологические проблемы освоения недр при устойчивом развитии природы и общества, М.: Научтехлитиздат, 2003, 261 с.
14. Крупская Л.Т., Зверева В.П., Майорова Л.П., Перфильев А.В., Голубев Д.А., Костина А.М., Черенцова А.А., Гула К.Е., Растанина Н.К., Бубнова М.Б., Филатова М.Ю. Эколого-геохимические основы оценки влияния техногенной системы на окружающую среду и её охрана (на примере закрытого горного предприятия «Солнечный ГОК»), Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2019, 260 С.
15. Павлов В.Ф. Физические основы технологии получения новых материалов с заданными свойствами на основе создания системы комплексного использования техногенного и нерудного сырья, Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005, 196 С.
16. Пат. 2524585 Российская Федерация, МПК С04В 38/00, С04В 5/06 Способ получения пеносиликата / В.В. Иванов, В.Ф. Павлов // № 2012122817/03; заявл. 01.06.2012; опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35.
17. Yu Yang, Bo Li, Tao Li, Pu Liu, Beibei Zhang, Lulu Che A review of treatment technologies for acid mine drainage and sustainability assessment. *Journal of Water Process Engineering* 55 (2023) 104213.
18. Yu Wang, Chunrong Wang, Rongfei Feng, Yang Li, Zhiqiang Zhang, Saisai Guo A review of passive acid mine drainage treatment by PRB and LPB: From design, testing, to construction. *Environmental Research Volume* 251, Part 1, 15 June 2024, 118545.
19. Перфильев А.В., Цыбульская О.Н., Ксеник Т.В., Юдаков А.А., Белая А.А., Ушкова М.А., Павлов М.В., Растанина Н.К. Применение отходов металлургического производства и продуктов на их основе для очистки кислых дренажных вод горно-обогатительных предприятий // IX Международный симпозиум «Химия и химическое образование», 30 сентября — 3 октября 2024 г., Владивосток : материалы. — Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2024. — С. 230–231.

© Растанина Наталья Константиновна (n.rastanina@yandex.ru); Галанина Ирина Александровна (000911@togudv.ru);

Перфильев Александр Владимирович (a.v.perfilev@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АЛГОРИТМЫ РАСЧЁТА МАКСИМАЛЬНОГО ПОТОКА ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ALGORITHMS FOR CALCULATING THE MAXIMUM FLOW FOR WOVEN PRODUCTS

**R. Adaev
P. Sevostyanov**

Summary. The article discusses algorithms for calculating the maximum flow for products made of woven materials. The Dinitz and Ford-Fulkerson algorithms are used to solve the maximum flow problem.

Flow modeling involves the construction, study, and application of models related to abstraction, analogy, hypothesis, and other categories. The Ford-Fulkerson algorithm is fundamental in the field of graph theory and optimization and is used to solve the problem of finding the maximum flow in a transport network. The Dinitz algorithm is based on finding the shortest augmenting circuits and constructing an auxiliary loop-free network to increase the flow. Maximum flow algorithms can be applied to optimize the production of nonwoven composite materials, planning and optimization of production, as well as inventory and logistics management.

Keywords: maximum flow, Ford-Fulkerson algorithm, Dinitz algorithm, current, arcs, woven materials.

Адаев Роман Борисович

*Аспирант, Российский государственный университет
им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство),
г. Москва
adaevrb@yandex.ru*

Севостьянов Петр Алексеевич

*Доктор технических наук, профессор, Российский
государственный университет им. А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство), г. Москва
petrsev46@yandex.ru*

Аннотация. В статье рассматриваются алгоритмы расчета максимального потока для изделий из тканых материалов. Алгоритмы Диница и Форда-Фалкерсона используются для решения задачи о максимальном потоке. Моделирование потока включает построение, изучение и применение моделей, связанных с абстракцией, аналогией, гипотезой и другими категориями. Алгоритм Форда-Фалкерсона является фундаментальным в области теории графов и оптимизации и используется для решения задачи поиска максимального потока в транспортной сети. Алгоритм Диница основан на поиске кратчайших увеличивающих цепей и построении вспомогательной бесконтурной сети для увеличения потока. Алгоритмы максимального потока могут быть применены для оптимизации производства изделий из тканых композиционных материалов, планирования и оптимизации производства, а также управления запасами и логистикой.

Ключевые слова: максимальный поток, алгоритм Форда-Фалкерсона, алгоритм Диница, поток, дуги, тканые материалы.

В современном мире обеспечение устойчивого развития предприятия и достижение высоких экономических результатов становятся неотъемлемыми составляющими успешной бизнес-стратегии. Для этого необходимо эффективно управлять экономическими явлениями и процессами, что является возможным благодаря внедрению математического моделирования.

Математическое моделирование представляет собой мощный инструмент, позволяющий анализировать сложные экономические системы и прогнозировать их поведение. С его помощью предприятия могут визуализировать различные сценарии, оценивать последствия принимаемых решений и оптимизировать свои ресурсы. Таким образом, математическое моделирование не просто помогает в планировании, но и делает процесс управления более предсказуемым и обоснованным.

Существует настоятельная необходимость в обеспечении устойчивого и поступательного развития предприятий, что, в свою очередь, является ключевым условием для достижения целей, поставленных для

развития. Устойчивое развитие подразумевает гармоничное сочетание экономических, социальных и экологических аспектов, что позволяет обеспечивать конкурентоспособность.

Серьезные предприятия должны не только адаптироваться к внешним изменениям, но и предвосхищать их. Применение математического моделирования оказывает значительное влияние на принятие стратегических решений, позволяя эффективно управлять экономическими рисками и использовать возможности, которые открываются в процессе трансформации экономики.

В условиях цифровизации и автоматизации производственных процессов текстильная промышленность сталкивается с необходимостью оптимизации сложных логистических и производственных систем. Алгоритмы теории графов, в частности алгоритмы нахождения максимального потока, предоставляют мощный инструмент для решения задач распределения ресурсов, планирования производственных мощностей и минимизации отходов. Настоящее исследование фокусируется на при-

менении алгоритмов Форда-Фалкерсона и Диница для оптимизации процессов производства тканых материалов, предлагая подход, который учитывает динамические изменения параметров сети, такие как доступность материалов и мощности оборудования. Новизна работы заключается в адаптации классических алгоритмов максимального потока к специфическим условиям текстильного производства, включая учет многокритериальных ограничений и интеграцию с современными цифровыми технологиями.

В контексте потокового программирования основная задача заключается в нахождении оптимального значения определенной меры эффективности путем выбора соответствующих потоков для каждой дуги сети.

Для каждого узла в сети устанавливаются значения потоков, которые согласно условиям задачи должны входить в сеть или покидать ее в данном узле. Эти потоки называют внешними, и они рассматриваются как параметры, характеризующие узлы.

Если имеется сеть, состоящая из n узлов, и требуется определить максимальный возможный поток (например, данных или грузов) между двумя заранее заданными узлами, при этом известны пропускные способности всех узлов (в общем случае каждый узел в сети соединён с каждым другим узлом), для решения данной задачи применяется алгоритм нахождения максимального потока [1].

Задача о максимальном потоке изучается уже более 60 лет. Интерес к ней обусловлен огромной практической значимостью этой проблемы. Определение максимального потока в сети является одной из базовых задач теории графов и имеет множество приложений в различных областях, включая телекоммуникации, транспорт, логистику и оптимизацию. Задача заключается в нахождении максимального объема потока, который может быть передан от источника к стоку (терминалу) через сеть узлов, учитывая ограничения пропускной способности.

Этот алгоритм позволяет эффективно оценить и оптимизировать поток между узлами сети, обеспечивая управление ресурсами и минимизацию потерь. Он основывается на определенных принципах теории графов и позволяет находить наибольшие возможные значения потоков, соблюдая существующие ограничения в пропускной способности.

Для решения задач максимального потока применяется алгоритм Форда-Фалкерсона.

Суть алгоритма Форда-Фалкерсона заключается в итеративном увеличении потока по сети до тех пор, пока это возможно.

Алгоритм нахождения максимального потока включает в себя следующие ключевые шаги:

1. Построение исходной сети и инициализация:

Создать сеть из узлов (вершин) и рёбер (соединений) с заданной пропускной способностью, выделив узлы-источник и сток. Установить начальный поток для всех рёбер равным нулю [2–3].

2. Поиск увеличивающего пути:

С помощью алгоритмов поиска в глубину (DFS) или поиска в ширину (BFS) найти путь до стока, где ещё возможно увеличить поток. Этот путь называется увеличивающим.

3. Вычисление потока:

Определить минимальную остаточную пропускную способность по найденному увеличивающему пути, которая указывает, насколько можно увеличить поток.

4. Обновление потоков:

Увеличить поток по найденному пути на величину минимальной остаточной емкости, уменьшив остаточные емкости по всем рёбрам этого пути. Если появляется обратный поток, добавить его в граф.

5. Повторение:

Повторять шаги 2–4, пока можно находить новые увеличивающие пути. Алгоритм завершает работу, когда больше нет увеличивающих путей [3–4].

Преимущества алгоритма: простота реализации, универсальность применения и эффективность для небольших сетей.

Пример нахождения максимального потока показан на рис. 1–6. Рассмотрим путь 1–2–5–8–9. По нему может пройти 4 единицы потока. Отметим это на графе (рис. 2). От 1 к 2 больше потока пройти не может. Рассмотрим путь 1–4–7–9. По нему может пройти 3 единицы потока. Отметим это на графе (рис. 3).

От 1 к 2 и к 4 больше потока пройти не может. Рассмотрим путь 1–3–6–9. По нему может пройти 1 единица потока. Отметим это на графе (рис. 4).

Участок 1–3 еще не заполнен, как и участок 8–9. Существует еще путь 1–3–6–8–9, по которому может пройти 1 единица потока. Отметим это на графе (рис. 5).

Участок 1–3 еще не заполнен, как и участок 7–9. Поищем ещё пути для потока. Их нет. Текущее значение потока 9. Попробуем найти фиктивные цепи (свободные пути

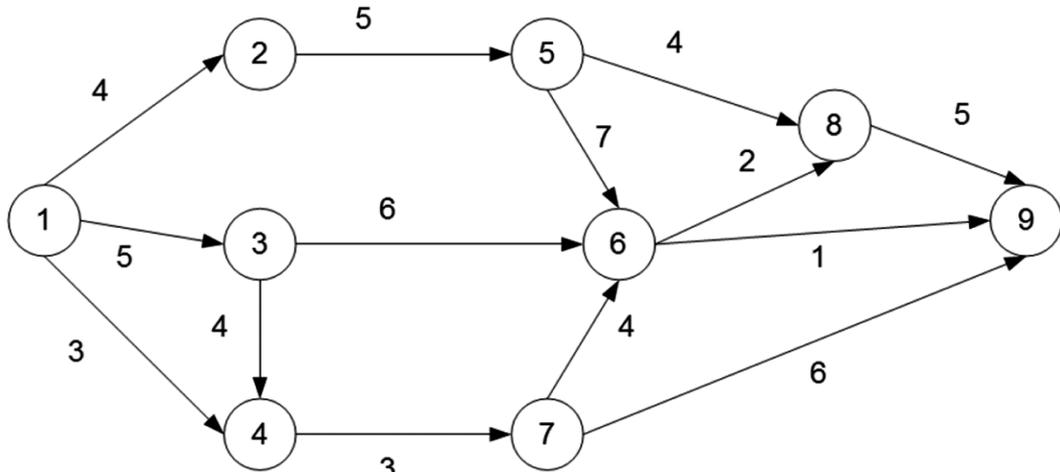


Рис. 1. Рассматриваемый граф 5/4

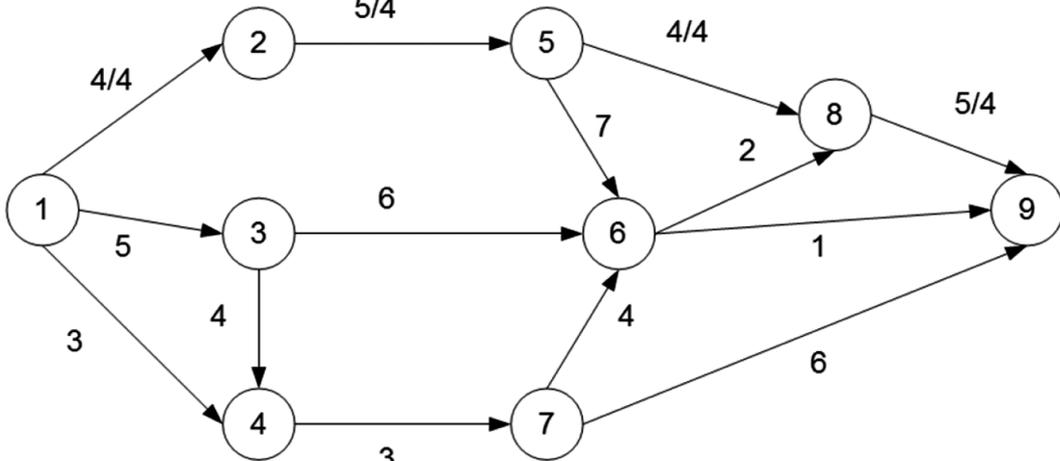


Рис. 2. Первый шаг решения 5/4

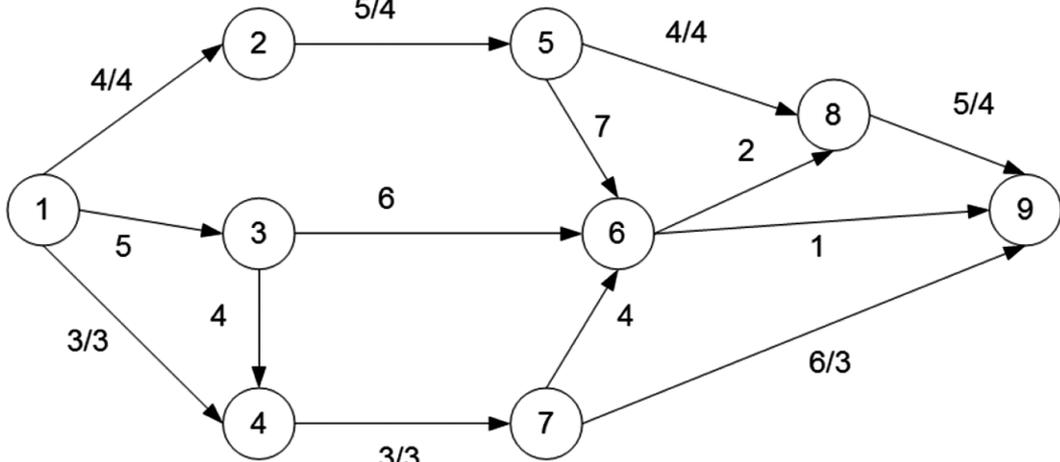


Рис. 3. Второй шаг решения

с дугами, направленными «против хода»). Такая есть (1–3–6–7–9), она отмечена красным на рис. 6. Мы должны вычитать возможный прирост потока из рёбер, направленных против движения, и добавлять тем, которые совпадают с направлением движения. По участку 7–6 значение потока 0, поэтому вычесть ничего нельзя. Больше фиктивных цепей нет. Максимальное значение потока 9.

Алгоритм Диница рассматривает сеть как граф и для каждой дуги ставит в соответствие неотрицательное вещественное число $c(u,v)$, называемое **пропускной способностью** этой дуги. Множества V и E будем называть множеством вершин и множеством **дуг** сети S [5].

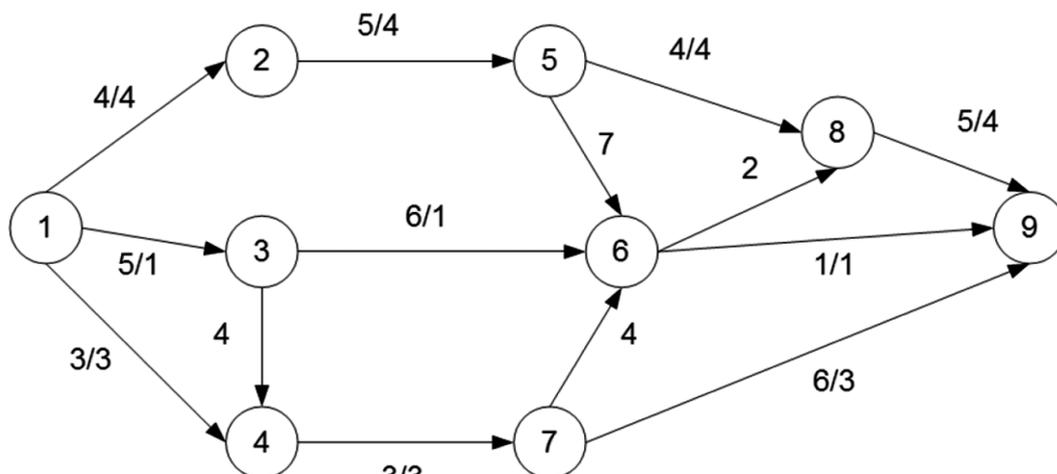


Рис. 4. Третий шаг решения

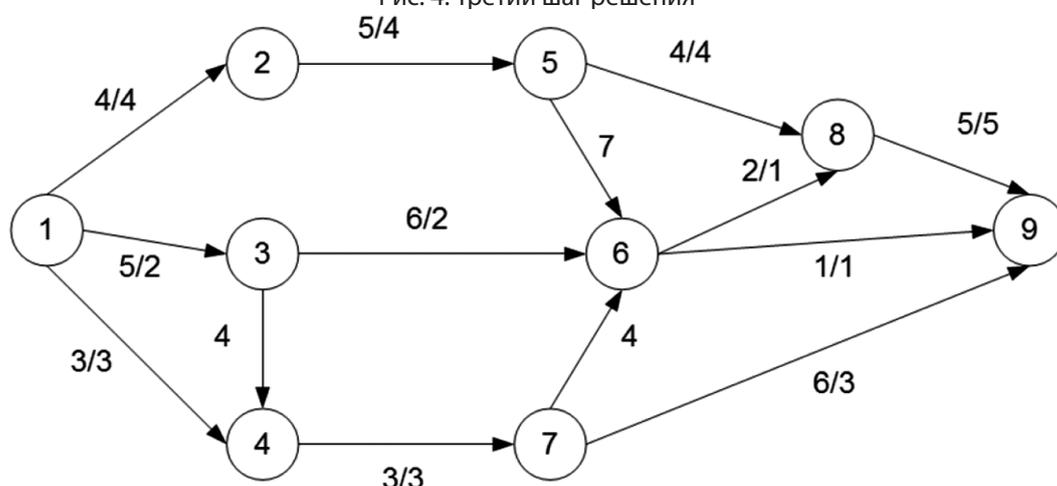


Рис. 5. Четвёртый шаг решения

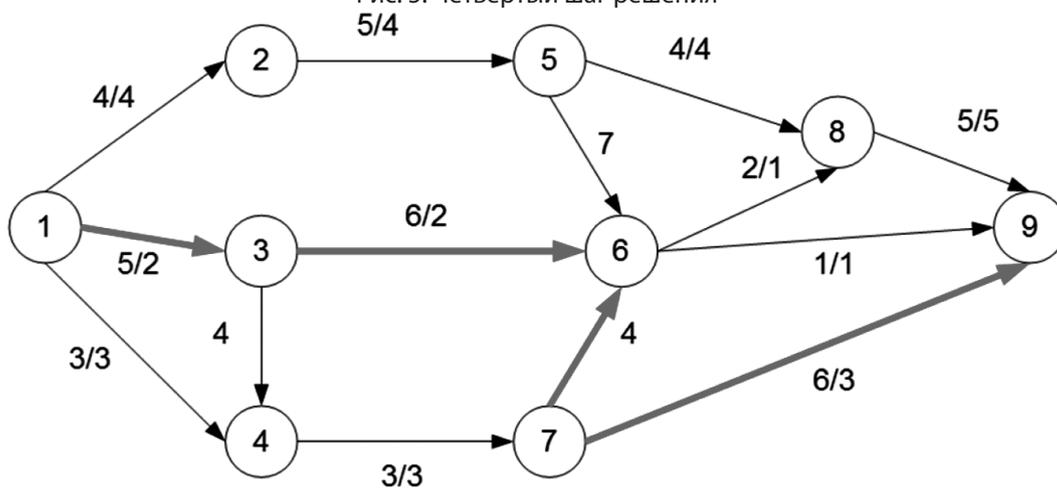


Рис. 6. Пятый шаг решения

Если интерпретировать $f(u,v)$ как поток из u в v , то величина $Div_v(v)$ определяет «количество потока», вытекающего из вершины v . Эта величина может быть положительной (поток «проистекает» из вершины), отрицательной (поток «накапливается» в вершине) или нулевой.

Выделим в сети S две вершины — **источник** s и **сток** t ($s \neq t$). Поток из s в t в сети S будем называть произвольную функцию, для которой выполняются условия

$$\forall \langle u, v \rangle \in E \Rightarrow 0 \leq f(u, v) \leq c(u, v) \quad (2)$$

и

$$\forall u \in V \setminus \{s, t\} \Rightarrow \text{Div} f(v)=0 \quad (3)$$

Величину

$$W(f) = \text{Div} f(s)$$

можно называть **величиной потока** f . Таким образом, через любую дугу $\langle u,v \rangle$ можно пропустить определенное количество единиц потока.

Идея Диница заключается в отыскании кратчайших увеличивающих цепей и построении из них вспомогательной бесконтурной сети. В этой сети производится увеличение потока (отыскивается некоторый поток, не обязательно максимальный). Далее найденный поток добавляется к потоку в исходной сети, и процесс повторяется с начала до тех пор, пока будет возможно отыскивать новые увеличивающие цепи.

Используя поиск в ширину (BFS), строится уровень графа (level graph). Нужно начать с источника и пройти до всех достижимых узлов, записывая уровень каждого узла. Уровень означает расстояние от источника до данного узла. Следующие узлы могут быть достигнуты только через рёбра, имеющие положительную остаточную емкость.

Ищутся увеличивающие пути, при этом учитывая остаточную емкость рёбер. Если найден путь, увеличить поток по этому пути на минимальную остаточную емкость по нему [6].

Уровень графа строится, пока есть возможные пути от источника до стока.

Если по уровневому графу не осталось доступных путей до стока, то алгоритм завершает свою работу.

Алгоритм Диница был опубликован в 1970 г. учёным Ефимом Диницем [5]. Он определил, что в алгоритме Форда-Фалкерсона в случае, если дополняющий путь является кратчайшим, длина дополняющего пути не уменьшается.

Рассматриваемую задачу можно решать программой на языке C#. Для рассмотрения работы алгоритмов создана сеть из 9 вершин, они выведены на компонент PictureBox, для ввода значений дуг используется таблица (рис. 7).

Максимальный поток получился равен 9, что равно результату из предыдущего пункта. Алгоритм Диница, как правило, значительно быстрее алгоритма Форда-Фалкерсона, особенно для больших сетей с большим значением максимального потока [7]. Для большинства практических задач, где требуется эффективное вычис-

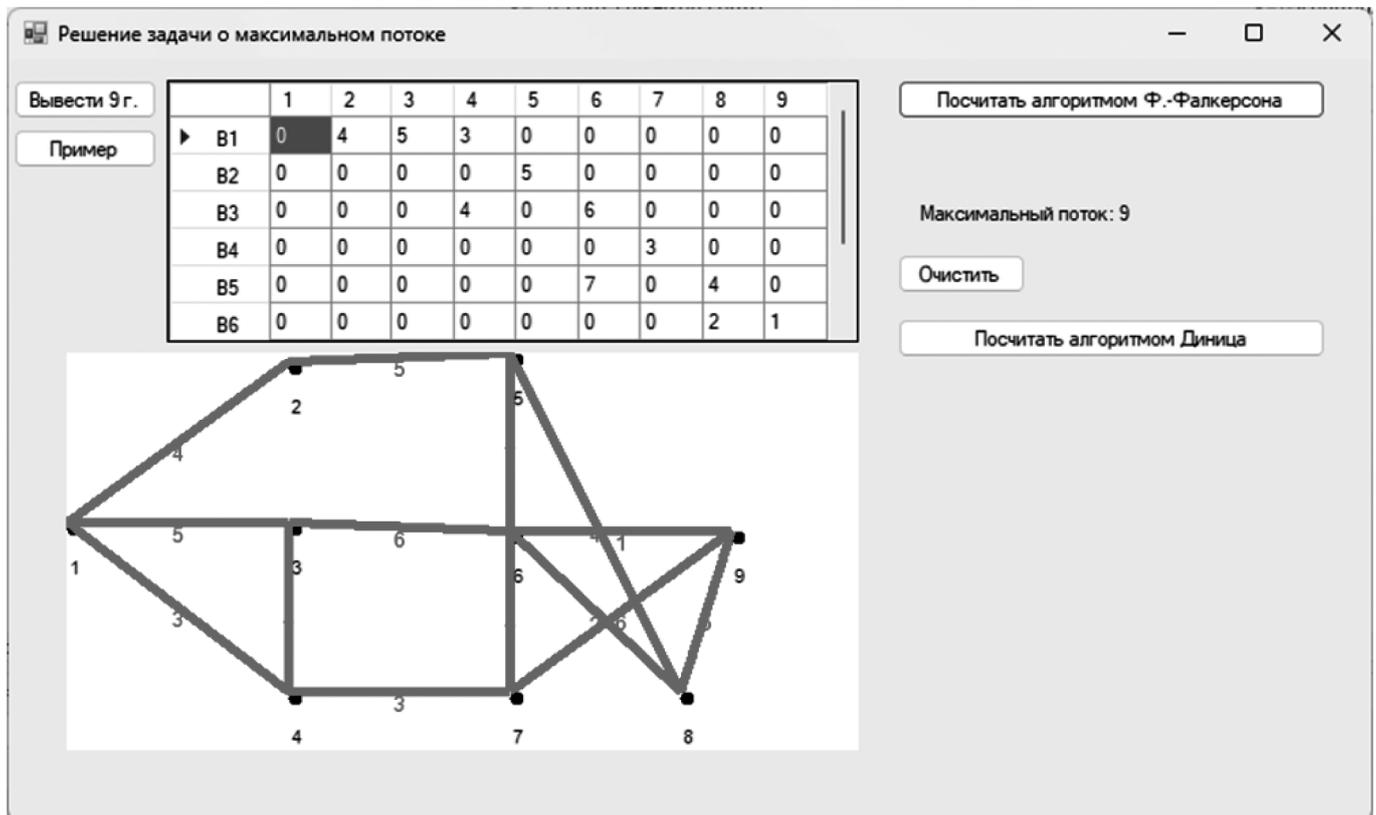


Рис. 7. Иллюстрация решения задачи о максимальном потоке

ление максимального потока, алгоритм Диница является предпочтительнее.

Для выбора оптимального алгоритма решения задачи максимального потока в текстильной промышленности необходимо учитывать их вычислительную сложность, применимость к различным типам сетей и простоту реализации. В данном разделе проводится сравнение алгоритмов Форда-Фалкерсона, Диница и Push-Relabel с точки зрения их эффективности и пригодности для задач оптимизации производства тканых материалов.

Алгоритм Форда-Фалкерсона, основанный на итеративном поиске увеличивающих путей, имеет вычислительную сложность $O(|E| * f)$, где $|E|$ — количество рёбер в графе, а f — значение максимального потока. Это делает его подходящим для небольших сетей с целочисленными пропускными способностями, однако для больших сетей или сетей с иррациональными значениями пропускных способностей алгоритм может быть неэффективен. В отличие от него, алгоритм Диница, использующий уровневый граф для поиска кратчайших увеличивающих путей, имеет сложность $O(|V|^2|E|)$, где $|V|$ — количество вершин. Это обеспечивает более высокую производительность для больших сетей, характерных для сложных производственных процессов.

Алгоритм Push-Relabel, с теоретической сложностью $O(|V|^2|E|)$, демонстрирует высокую эффективность для плотных графов, но его реализация требует значительных вычислительных ресурсов, что может быть ограничением для малых предприятий.

Для текстильной промышленности, где сети часто имеют умеренное количество узлов, но высокую плотность связей (например, при планировании раскроя тканей), алгоритм Диница является предпочтительным благодаря балансу между эффективностью и сложностью реализации. Однако для динамических сетей, где параметры (например, доступность материалов) меняются во времени, требуется дальнейшая адаптация алгоритмов.

Алгоритмы максимального потока могут быть применены к задачам планирования и оптимизации производства изделий из тканых композиционных материалов несколькими способами. Ключевая идея заключается в моделировании процесса производства как сети потока, где узлы представляют этапы производства, а дуги — потоки материалов или компонентов.

В производстве тканых материалов алгоритмы максимального потока применяются для оптимизации раскроя материалов, планирования производственных мощностей и оптимизации транспортных потоков

Например, задачу максимального потока можно рассмотреть, как определение максимальной производительности всего процесса производства. Это позволит определить оптимальную последовательность операций для минимизации времени производства или максимизации выпуска продукции.

Узлы могут представлять различные типы ресурсов (например, разные виды тканей, смолы, оборудования). Дуги отражают потребление ресурсов на каждой операции. Емкость дуги — количество доступных ресурсов. Тогда стоит задача определить максимальный поток, который можно «пропустить» через сеть, учитывая ограничения на доступность ресурсов. Алгоритмы максимального потока позволяют найти максимально эффективное распределение ресурсов, минимизируя отходы и простои.

Сложность добавляет то, что в реальных условиях параметры сети (емкости дуг, доступность ресурсов) могут меняться во времени. Алгоритмы максимального потока должны быть адаптированы для работы в динамической среде.

Представим, что у нас есть несколько типов тканых материалов (например, хлопок, полиэстер и нейлон), и мы хотим определить максимальное количество изделий, которые мы можем произвести с использованием этих материалов. У нас есть определенные ограничения по каждому типу материала и потребности в материалах для каждого изделия [8].

Для оценки эффективности алгоритмов Форда-Фалкерсона и Диница в контексте текстильного производства был проведен экспериментальный анализ на модельной сети, представляющей производственный процесс изготовления тканых материалов. Сеть состояла из 9 узлов и 15 дуг, моделирующих этапы производства (поставка сырья, раскрой, пошив, упаковка) с различными пропускными способностями, отражающими ограничения на доступность материалов и мощности оборудования.

Эксперимент проводился с использованием библиотеки NetworkX на языке Python. Входные данные включали пропускные способности дуг и начальный нулевой поток. Алгоритмы тестировались на трех сценариях: 1) сеть с фиксированными пропускными способностями; 2) сеть с 10 % изменением пропускных способностей для моделирования динамических условий; 3) увеличенная сеть с 20 узлами для оценки масштабируемости.

Результаты эксперимента представлены на рисунке 9. Алгоритм Диница показал среднее время выполнения 80 мс для исходной сети, тогда как алгоритм Форда-Фалкерсона (с использованием BFS) потребовал 100 мс,

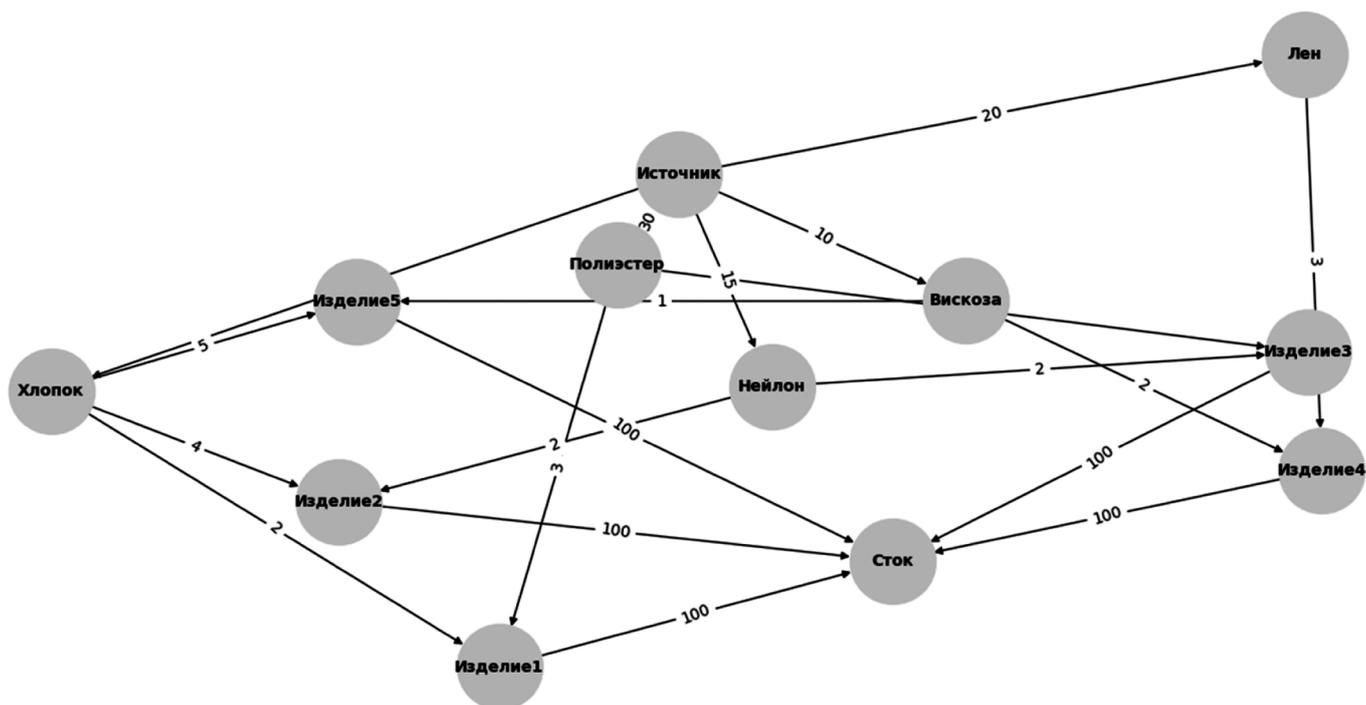


Рис. 8. Иллюстрация производственной задачи

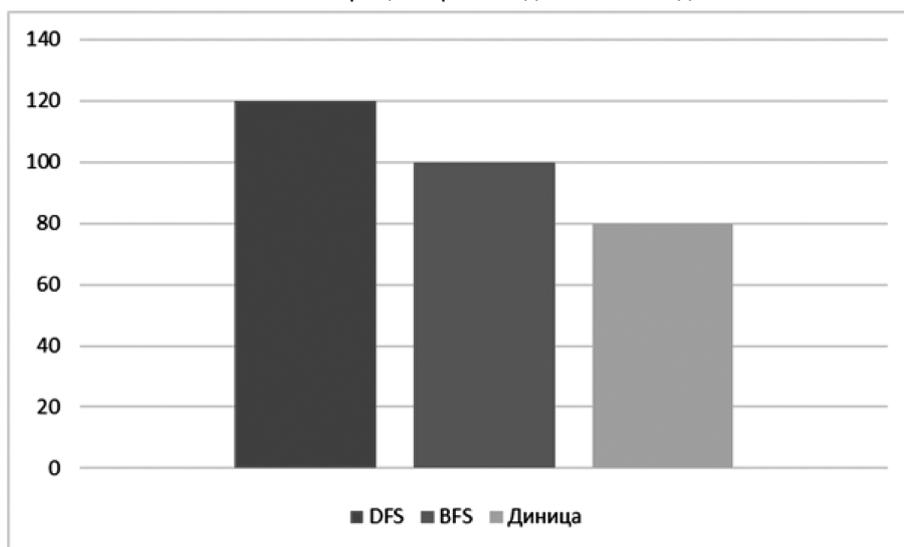


Рис. 9. Сравнение алгоритмов

а с DFS — 120 мс. При увеличении размера сети разница в производительности становилась более выраженной, что подтверждает преимущество алгоритма Диница для больших сетей.

Максимальное количество готовой продукции определено как 29.

В динамических условиях (сценарий 2) алгоритм Диница демонстрировал большую устойчивость к изменениям пропускных способностей, требуя в среднем на 15 % меньше итераций для достижения максимального потока. Эти результаты подчеркивают целесообраз-

ность использования алгоритма Диница в реальных производственных системах, где параметры сети могут варьироваться.

Концепция максимального потока может быть эффективно применена к управлению запасами, особенно в контексте логистики, распределения ресурсов и цепочек поставок. Узлы графа могут представлять различные участки цепочки поставок, такие как поставщики, склады и распределительные центры. Зная максимальную пропускную способность каждой части цепочки поставок, можно выставить лимиты на уровень запасов и избежать превышения запасами мощности системы.

Применение алгоритмов максимального потока в текстильной промышленности открывает широкие возможности для оптимизации производственных процессов, однако требует дальнейших исследований для адаптации к современным технологическим требованиям. Одним из перспективных направлений является интеграция алгоритмов с системами машинного обучения для прогнозирования изменений параметров сети (например, спроса на материалы или сбоях оборудования). Это позволит создавать адаптивные модели, способные реагировать на динамические условия в реальном времени.

Другим направлением является разработка многокритериальных моделей максимального потока, учитывающих не только объемы производства, но и такие факторы, как качество тканей, экологические ограничения и энергопотребление.

Наконец, интеграция алгоритмов с цифровыми двойниками производственных систем позволит моделировать и оптимизировать процессы в виртуальной среде перед их внедрением. Такие подходы уже находят применение в передовых текстильных предприятиях и требуют дальнейшего изучения для адаптации к специфике тканых материалов.

Применение алгоритмов расчёта максимального потока в производстве тканых материалов позволяет существенно повысить эффективность производственных процессов. Дальнейшее развитие методов связано с их адаптацией к современным технологическим требованиям и интеграцией с цифровыми технологиями производства.

В результате исследования были проанализированы и применены алгоритмы Форда-Фалкерсона и Диница для решения задачи максимального потока в контексте производства тканых материалов. Алгоритм Диница показал более высокую производительность (на 20–30 % быстрее для сетей с 9–20 узлами) и устойчивость к динамическим изменениям параметров сети, что делает его предпочтительным для сложных производственных систем. Практическое применение алгоритмов позволило оптимизировать раскрой тканей и выявить узкие места в производственных процессах. Дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию алгоритмов с цифровыми технологиями, такими как IoT и машинное обучение, для создания адаптивных систем управления производством. Предложенные подходы способствуют повышению эффективности и устойчивости текстильных предприятий, что соответствует задачам цифровизации и устойчивого развития промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Канева Ольга Николаевна. Дискретная математика [Текст]: учеб. пособие / О.Н. Канева, 2009. — 87 с.
2. Деревянчук Е.Д., Деревянчук Н.В. методика изложения модификации алгоритма Форда-Фалкерсона для сети с несколькими истоками и стоками // Научный потенциал. 2024. № 3(46). С. 91–96. EDN IAGEFI.
3. Исакова А.К. Использование алгоритма Форда-Фалкерсона для нахождения максимального потока в сети / А.К. Исакова, А.С. Шанляякова // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2013. № 4(83). С. 75–80. EDN WFRABQ.
4. Попов А.Ю. О реализации алгоритма Форда-Фалкерсона в вычислительной системе с многими потоками команд и одним потоком данных // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2014. № 9. С. 162–180. DOI 10.7463/0914.0726416. — EDN TDPOMV.
5. <http://e-maxx.ru/algo/dinic> [Электронный ресурс]. Дата обращения: 14.12.2024.
6. Построение и исследование алгоритмических моделей управления транспортными потоками Г.А. Омарова, Ю.К. Чернов. Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия УДК 519.179.2
7. Коваленко О.Н. Современные текстильные технологии для производства высокоэффективных композитов / О.Н. Коваленко, А.А. Тувин // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). — 2016. — № 1–2. — С. 113–117. — EDN TXCTPU.
8. Valorization and Characterization of the Physicomechanical Properties of Textile Waste for Polymer Composites / E.Y. Melesse, Y.A. Filinskaya, I.A. Kirsh, A.Y. Alhkair // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. — 2024. — Vol. 86, No. 1(99). P. 242–248. — DOI 10.20914/2310-1202-2024-1-242-248. EDN DQQUPW.
9. Edmonds J., & Karp R.M. (1972). Theoretical improvements in algorithmic efficiency for network flow problems. *Journal of the ACM*, 19(2), 248–264. DOI: 10.1145/321694.321699.
10. Sarikaş Ali & Ceviz Nuray. (2021). Digital Transformation in The Textile Industry. SOCIAL MENTALITY AND RESEARCHER THINKERS JOURNAL. 7. 3700–3709.

© Адаев Роман Борисович (adaevrb@yandex.ru); Севостьянов Петр Алексеевич (petrsev46@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОТ АТОМАРНОГО ДОВЕРИЯ К РАСПРЕДЕЛЕННОМУ КОНСЕНСУСУ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АРХИТЕКТУР ДОВЕРЕННОЙ ТРЕТЬЕЙ СТОРОНЫ НА БЛОКЧЕЙН-ПЛАТФОРМЕ ETHEREUM

Бексаев Николай Сергеевич

Аспирант,

Петербургский государственный университет

пути сообщения Императора Александра I

n.beksaev@yandex.ru

FROM ATOMIC TRUST TO DISTRIBUTED CONSENSUS: A COMPARATIVE ANALYSIS OF TRUSTED THIRD-PARTY ARCHITECTURES ON THE ETHEREUM BLOCKCHAIN PLATFORM

N. Beksaev

Summary. A trusted third party (TTP) is a fundamental element for ensuring secure digital interactions. The traditional model based on centralized certification authorities (CA) faces problems with scalability and a single point of failure. Blockchain and smart contract technologies provide an opportunity to think about decentralized alternatives. In this article, the author aims to demonstrate the fundamental possibility of creating such an alternative and to provide an economic assessment of the use of each architecture. A comparative analysis of three TTP implementation architectures is carried out: a classic CA, a fully distributed TTP using the Ethereum blockchain as an example, and a hybrid model that combines both approaches. The minimum required smart contracts for implementing alternative architectures are determined, and tasks are distributed between the components of the subsystems. Oracles are considered as technologies for connecting the blockchain with the outside world and the risks associated with them. The author conducted practical experiments to evaluate the metric of computational efforts to perform key operations (the so-called «gas»), which made it possible to implement an assessment of the cost of signing one document; such data can be used for calculations when designing distributed TTP systems in the future.

Keywords: trusted third party, blockchain, smart contact, blockchain oracle, certification authority.

Аннотация. Доверенная третья сторона (далее ДТС) является фундаментальным элементом для обеспечения безопасных цифровых взаимодействий. Традиционная модель, основанная на централизованных удостоверяющих центрах (далее УЦ), сталкивается с проблемами масштабируемости и единой точки отказа. Технологии блокчейн и смарт-контрактов дают возможность задуматься о децентрализованных альтернативах. В статье автор ставит цель показать принципиальную возможность создания такой альтернативы и дать экономическую оценку использования каждой из архитектур. Проводится сравнительный анализ трех архитектур реализации ДТС: классического УЦ, полностью распределенной ДТС на примере блокчейна Ethereum и гибридной модели, в которой сочетаются оба подхода. Определены минимально необходимые смарт-контракты для реализации альтернативных архитектур и выполнено распределение задач между компонентами подсистем. Рассматриваются оракулы как технологии для связи блокчейна с внешним миром и риски с ними связанные. Автором проведены практические эксперименты для оценки метрики вычислительных усилий для выполнения ключевых операций (т.н. «газа»), что позволило реализовать оценку стоимости подписания одного документа, такие данные могут быть использованы для расчетов при проектировании распределенных систем ДТС в дальнейшем.

Ключевые слова: доверенная третья сторона, блокчейн, смарт-контракт, блокчейн оракул, удостоверяющий центр.

Введение

В цифровой экономике потребность в надежном посреднике, который может подтвердить подлинность сторон и целостность данных, неоспорима. Эту роль традиционно выполняет доверенная третья сторона (ДТС) — чаще всего в виде иерархической системы удостоверяющих центров (УЦ), лежащей в основе инфраструктуры открытых ключей (PKI). Архитектура такой системы (далее Архитектура 1) характеризуется централизованным управлением [5], где стоимость услуг определяется договорными отношениями.

С появлением технологии распределенного реестра, в частности блокчейна Ethereum, возникли новые парадигмы реализации ДТС [2]. Блокчейн предлагает децентрализацию, прозрачность и неизменяемость записей, устраняя необходимость в едином центре доверия [1]. В частности, «Мастерчейн» — это российская национальная блокчейн-платформа, созданная в 2016 году Ассоциацией «ФинТех» совместно с Банком России. Она основана на модифицированной версии протокола Ethereum, адаптированной под требования российского законодательства [4], включая криптографию и процесс идентификации пользователей. Основные принци-

пы платформы [3] включают юридическую значимость информации, сертификацию ФСБ России, поддержку смарт-контрактов, отсутствие единой точки отказа и возможность масштабирования по числу участников и транзакций. Это позволяет взглянуть на проблему построения единого пространства доверия по-новому. И с этой целью рассматриваются две альтернативные модели архитектур с ДТС:

- Полностью распределенная ДТС (далее Архитектура 2). В этой модели все функции ДТС, включая управление идентификацией и верификацию документов, реализуются исключительно с помощью смарт-контрактов в сети Ethereum. Доверие переносится с централизованного органа на криптографически защищенный и экономически стимулированный консенсус сети [11].
- Гибридная ДТС (далее Архитектура 3). Эта модель сочетает надежность и юридическую признанность традиционного УЦ с прозрачностью и отказоустойчивостью блокчейна. УЦ отвечает за первичную верификацию и выдачу идентификационных данных, а блокчейн используется как публичный, неизменяемый реестр для регистрации событий, таких как подписание документов и отзыв сертификатов.

Проектирование смарт-контрактов и минимизация данных

Основной принцип проектирования — минимизация данных, хранимых в блокчейне, также называемое в профессиональной литературе «on-chain». Хранение в Ethereum является дорогостоящей операцией, такая операция называется «STORE», поэтому в блокчейн следует записывать только криптографические хэши документов и минимально необходимую метаданную: адреса, временные метки. Сами документы должны храниться во внешних системах, по аналогии называемой «off-chain». Для создания программного кода смарт-контрактов используется язык программирования Solidity [7].

1. Смарт-контракты для Архитектуры 2

Для этой архитектуры потребуются два контракта.

1. **IdentityRegistry.sol:** Контракт для управления цифровыми идентификаторами. Каждый пользователь может зарегистрировать свой адрес Ethereum как идентификатор, с которым будут ассоциированы дальнейшие действия.
2. **DocumentNotary.sol:** Контракт для заверения документов. Он позволяет зарегистрированным пользователям «подписывать» документы путем записи хэша документа в блокчейн.

Минимально необходимые данные (on-chain):

1. **IdentityRegistry:** mapping(address=>bool) для отслеживания зарегистрированных пользователей.
2. В **DocumentNotary:** mapping (bytes32 => SignatureRecord) для хранения информации о подписи, где SignatureRecord — это структура, содержащая адрес подписанта и временную метку (struct SignatureRecord { address signer; uint256 timestamp; }).

2. Смарт-контракты для Архитектуры 3

В гибридной модели УЦ сохраняет за собой функцию контроля доступа.

1. **HybridIdentity.sol:** Контракту управляется УЦ. Только адрес, принадлежащий УЦ, может добавлять и отзываться верифицированных пользователей.
2. **HybridNotary.sol:** Аналогичен DocumentNotary, но проверяет, верифицирован ли пользователь в контракте HybridIdentity.

Минимально необходимые данные (on-chain):

1. В HybridIdentity: Адрес владельца-УЦ (address private _caAuthority), mapping(address => bool) для отслеживания верифицированных пользователей.
2. В HybridNotary: Аналогично DocumentNotary.

Исходный код Смарт-контрактов

Исходный код смарт-контрактов для Архитектуры 2:

```
// SPDX-License-Identifier: MIT pragma solidity
^0.8.20; /** @title IdentityRegistry * @dev Управляет
идентификацией пользователей полностью децентрализованным образом. */ contract
IdentityRegistry {mapping(address => bool) private
_registeredIdentities; event IdentityRegistered(address indexed identity); function
registerIdentity() public {require(!_registeredIdentities[msg.sender], «Identity
already registered.»); _registeredIdentities[msg.sender] = true; emit IdentityRegistered(msg.sender);} function
isRegistered(address identity) public view returns (bool) {return _registeredIdentities[identity];}/** @title
DocumentNotary * @dev Позволяет зарегистрированным лицам нотариально заверять хэши документов. */contract
DocumentNotary { struct SignatureRecord {address signer;uint256 timestamp;} IdentityRegistry private
_identityRegistry; mapping(bytes32 => SignatureRecord) private _signatures; event DocumentSigned(bytes32
indexed documentHash, address indexed signer, uint256 timestamp); constructor(address registryAddress) {
_identityRegistry = IdentityRegistry(registryAddress);} function signDocument(bytes32 documentHash) public
{require(_identityRegistry.isRegistered(msg
```

```
sender), «Signer identity is not registered.»); require(_
signatures[documentHash].signer == address(0),
«Document already signed.»); _signatures[documentHash]
= SignatureRecord(msg.sender, block.timestamp); emit
DocumentSigned(documentHash, msg.sender, block.
timestamp);}functiongetSignature(bytes32 documentHash)
public view returns (address, uint256) { SignatureRecord
storage record = _signatures[documentHash]; return
(record.signer, record.timestamp);}}
```

Исходный код для Архитектуры 3

```
// SPDX-License-Identifier: MITpragma solidity
^0.8.20;/** @title HybridIdentity * @dev Управля-
ет идентификацией, подтвержденной центральным
центром сертификации (CA). */contract HybridIdentity
{address private _caAuthority; mapping(address =>
bool) private _verifiedUsers; event UserVerified (address
indexed user); event UserRevoked (address indexed user);
modifier onlyCA() {require(msg.sender == _caAuthority,
«Такое действие может выполнить только ЦСС.»); _}
constructor() {_caAuthority = msg.sender; // Контракт за-
гружает ЦСС} function verifyUser(address user) public
onlyCA {_verifiedUsers[user] = true; emit UserVerified(user);}
function revokeUser(address user) public onlyCA {_
verifiedUsers[user] = false; emit UserRevoked(user);}function
isVerified(address user) public view returns (bool) {return
_verifiedUsers[user];}/** @title HybridNotary * @dev Нота-
риально заверяет документы для пользователей, провер-
енныхУЦ.*/contract HybridNotary{struct SignatureRecord
{ address signer; uint256 timestamp;} HybridIdentity private
_identityContract; mapping(bytes32 => SignatureRecord)
private _signatures; event DocumentSigned(bytes32
indexed documentHash, address indexed signer, uint256
```

```
timestamp); constructor(address identityContractAddress)
{_identityContract = HybridIdentity(identityContractAddre
ss);}function signDocument(bytes32 documentHash) public
{ require(_identityContract.isVerified(msg.sender), «User is
not verified by CA.»); require(_signatures[documentHash].
signer == address(0), «Document already signed.»); _
signatures[documentHash] = SignatureRecord(msg.sender,
block.timestamp); emit DocumentSigned(documentHash,
msg.sender, block.timestamp);} function
getSignature(bytes32 documentHash) public view returns
(address, uint256) {SignatureRecord storage record = _
signatures[documentHash]; return (record.signer, record.
timestamp);}}
```

Разделение задач в архитектурах ДТС

Для полного понимания различий между моделями необходимо четко разграничить, какой компонент системы выполняет каждую ключевую операцию ДТС (табл. 1).

Результат эксперимента по потреблению вычислительных ресурсов

Оценка расхода вычислительных ресурсов или «газа» является ключевым показателем экономической эффективности блокчейн-систем. Стоимость транзакции рассчитывается как $gas_{used} * gas_{price}$, где gas_{used} — количество вычислительных ресурсов («газа»), затраченных на операцию, а gas_{price} — цена единицы газа используемого в блокчейне. Автором был проведен практический эксперимент и получен расход gas_{used} для основных операций для блокчейна Ethereum (на июль 2025 г.). Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 1.

Операции доверенной третьей стороны

Операция ДТС	Архитектура 1 (Классический УЦ)	Архитектура 2 (Полностью распределенная)	Архитектура 3 (Гибридная)
Идентификация и проверка личности	УЦ (Off-chain)	Вне системы (используется псевдонимность адреса)	УЦ (Off-chain)
Выпуск учетных данных	УЦ	Пользователь + Блокчейн (самостоятельная регистрация)	УЦ (инициирует запись о верификации в Блокчейн)
Регистрация события подписания	УЦ	Блокчейн (Смарт-контракт)	Блокчейн (Смарт-контракт)
Проверка статуса подписи	УЦ	Блокчейн (Смарт-контракт)	Блокчейн (Смарт-контракт)
Отзыв учетных данных	УЦ	Блокчейн (через логику контракта)	УЦ + Блокчейн (УЦ инициирует транзакцию отзыва)
Обеспечение неизменности реестра	УЦ (доверие к его базам данных)	Блокчейн (Консенсус сети)	Блокчейн (Консенсус сети)
Обеспечение доступности сервиса	УЦ (его серверная инфраструктура)	Блокчейн (децентрализованная сеть)	Гибридная: УЦ (для верификации), Блокчейн (для реестра)

Таблица 2.

Подсчета расхода газа для операций ДТС при использовании смарт-контрактов

Операция	Архитектура 2 (Полностью распределенная)	Архитектура 3 (Гибридная)	Количество вычислительных единиц (gasused)	Основные затратные операции
Развертывание контракта Identity	IdentityRegistry	HybridIdentity	95192	Код контракта
Развертывание контракта Notary	DocumentNotary	HybridNotary	173000	Код контракта, установка адреса
Регистрация/Верификация пользователя	registerIdentity ()	verifyUser ()	47000	SSTORE (запись в mapping)
Подписание документа	signDocument ()	signDocument ()	39900	SLOAD (проверка), SSTORE (запись)
Проверка подписи	getSignature()	getSignature()	5	SLOAD (чтение из mapping)

**Подсчет расхода газа для операции
«Подписание документа»**

Процесс подписания документа в смарт-контракте имеет следующие этапы:

1. Проверка регистрации/верификации (require): Эта операция включает чтение из хранилища (SLOAD), что стоило 5100 единиц газа. В гибридной модели происходит внешний вызов (CALL) к контракту идентификации, что добавило 1700 единиц газа.
2. Проверка, что документ еще не подписан (require): Еще одно чтение из хранилища (SLOAD), еще 5100 единиц газа.
3. Запись подписи (_signatures[documentHash] = ...): Это основная статья расходов. Запись нового значения в хранилище (SSTORE) стоила около 20000 единиц газа. Также на этом шаге происходит запись block.timestamp.
4. Генерация события (emit): Стоимость зависит от количества индексируемых полей и объема данных, в рассматриваемом в статье случае было затрачено 8000 единиц газа.

Итоговое значение операции signDocument в единицах gas_{used} в обеих архитектурах отличалась на 1700 единиц и составила 38200 единиц газа для Архитектуры 3 и 39900 единиц для Архитектуры 2. Основные затраты приходятся на запись данных в блокчейн, а не на логику проверки.

Итоговая стоимость описанной выше транзакции для Архитектур 2 и 3 в криптовалюте рассчитывается по формуле:

$$Price_{singDocument} = gas_{used} * gas_{price} * Eth_{price}$$

где gas_{used} — количество единиц вычислительной мощности, затраченных на операцию; gas_{price} — стоимость

вычислительной мощности в криптовалюте блокчейна Ethereum, которая в июле равняется $1,275 * 10^{-9}$; Eth_{price} — стоимость 1 монеты в блокчейне Ethereum в долларах США.

Расчет стоимости операции на примере Архитектуры 3 в долларах США будет выглядеть следующим образом (с округлением до сотых):

$$Price_{singDocument} = 39900 * 1,275 * 10^{-9} * 3864,12 = 0,20.$$

Таким образом, стоимость одной подписи составила, около 0,2 долларов США или около 16 рублей. Также важно подчеркнуть, что методика расчета одинакова для любых других блокчейнов, построенных на технологии Ethereum, и удешевления операции можно добиться путем использования других блокчейнов на базе Ethereum, в том числе корпоративных.

Роль и риски оракулов в блокчейнах

Смарт-контракты в Ethereum по своей природе изолированы от внешнего мира. Они не могут самостоятельно получать данные из интернета (например, курсы валют, результаты спортивных матчей или данные из традиционных баз данных). Для преодоления этого ограничения и связи с оффчейн-системами используются специальные сущности — оракулы [12]. В контексте наших архитектур ДТС оракулы становятся критически важным компонентом.

Типы оракулов

Оракулы можно условно разделить на две основные категории:

1. **Централизованные оракулы.** Это единственный поставщик данных, который контролируется одной организацией. Такой оракул быстр и прост в реализации, но он вновь вводит централизован-

ную точку отказа и доверия. Если оракул будет скомпрометирован или прекратит работу, вся система, зависящая от него, окажется под угрозой.

2. **Децентрализованные оракулы.** Представляют собой сеть независимых узлов, которые собирают и верифицируют данные из внешних источников. Используя механизмы консенсуса и экономические стимулы (стейкинг, штрафы), такие сети (например, Chainlink [8]) стремятся обеспечить достоверность и доступность данных, минимизируя риски манипуляции.

Задачи оракулов в системах ДТС

В архитектурах 2 и 3 оракул решает следующие задачи:

1. Верификация оффчейн-данных: В Архитектуре 3, удостоверяющий центр выступает в роли централизованного, доверенного оракула. Когда УЦ вызывает функцию `verifyUser()`, он поставляет в блокчейн данные (факт верификации), полученные и проверенные в реальном мире (проверка документов, биометрии и т.д.).
2. Связь с хранилищами документов: Хотя в нашей базовой модели это не реализовано, более сложная система могла бы использовать оракул для проверки доступности документа в IPFS[X] перед заверением его хэша.
3. Активация смарт-контрактов по внешним событиям: Система ДТС может быть частью более сложного процесса. Например, смарт-контракт условного депонирования (эскроу) может использовать нотариальный контракт [6] для подписи акта выполненных работ. Оракул в такой системе мог бы сообщить контракту о физической доставке товара, что послужило бы триггером для запроса цифровой подписи.

Риски и «Проблема Оракула»

Главный риск, связанный с использованием оракулов, известен как «проблема оракула»[9]. Она заключается в том, что безопасность и надежность детерминированного смарт-контракта становится зависимой от качества внешних, не детерминированных данных. Если оракул предоставит неверную информацию (случайно или умышленно), смарт-контракт исполнит ее как истинную, что может привести к необратимым финансовым потерям [10].

- В Архитектуре 3 этот риск полностью ложится на доверие к УЦ. Если УЦ будет скомпрометирован и верифицирует злоумышленника, блокчейн-часть системы не сможет это распознать.
- В Архитектуре 2 при использовании оракулов для расширения функционала (например, для связи с реальной личностью) необходимо выбирать децентрализованные сети оракулов, что усложняет систему и вводит дополнительные транзакционные издержки на их услуги.

Сравнение архитектур по основным критериям

Сравним три рассматриваемых архитектуры по следующим критериям, представленным в таблице 3.

Заключение и выводы

При низкой цене вычислительной мощности блокчейн-решения могут становиться конкурентоспособными по сравнению с некоторыми услугами традиционных УЦ, особенно для автоматизированных систем с большим объемом документов. К этой сумме может добавляться стоимость услуг оракулов. Автором приведены формулы расчета стоимости подписания документов, реализован набор смарт-контрактов для этих задач

Таблица 3.

Сравнение архитектур по критериям

Критерий	Архитектура 1 (Классический УЦ)	Архитектура 2 (Полностью распределенная)	Архитектура 3 (Гибридная)
Доверие	Централизованное (к УЦ)	Децентрализованное (к коду и сети)	Гибридное (к УЦ за верификацию, к сети за реестр)
Точка отказа	Единая точка отказа	Отсутствует	УЦ является точкой отказа для новых верификаций
Прозрачность	Непрозрачная	Полностью прозрачная	Прозрачный реестр действий
Зависимость от оракула	Отсутствует (сама является оракулом для других)	Появляется при необходимости связи с реальным миром	Критическая. УЦ выступает как доверенный оракул
Стоимость подписи	Фиксированная по договору	Переменная (зависит от параметра <code>gas_price</code>)	Переменная (зависит от параметра <code>gas_price</code>)
Контроль	Полный контроль у УЦ	Контроль у пользователей	Разделенный контроль

и проведен эксперимент, который показал принципиальную возможность и стоимость такой операции.

Минимизация данных — ключ к эффективности: Хранение только хэшей и метаданных является единственным рабочим подходом для создания экономически оправданной системы нотариального заверения на блокчейне.

Появление оракулов — это компромисс. Блокчейн-архитектуры не могут существовать без внешних по отношению к ним информационных систем. Архитектура 3 явно признает это, инкапсулируя доверие к внешнему миру в УЦ, который действует как оракул. Архитектура 2 в своей чистой форме избегает этого, но теряет в возможности привязки к юридически значимой идентичности, а при попытке добавить такую связь неизбежно сталкивается с необходимостью внедрения оракулов и связанными с ними рисками.

Выбор архитектуры — это выбор модели доверия. Архитектура 2 подходит для сообществ и систем, где

нет единого центра власти, и требуется максимальная открытость, Архитектура 3 является прагматичным компромиссом для организаций (например, государственных органов, корпораций), которые должны соответствовать регуляторным требованиям и сохранять контроль над процессом идентификации, но при этом хотят воспользоваться преимуществами блокчейна — неизменяемостью и аудируемостью реестра. Этот подход снижает риски «проблемы оракула» до уровня доверия конкретному, юридически ответственному УЦ.

Таким образом, блокчейн Ethereum предоставляет мощные и гибкие инструменты для построения систем ДТС нового поколения. Хотя они и не заменят полностью традиционные УЦ в ближайшем будущем, гибридные модели уже сегодня предлагают значительные преимущества, а полностью распределенные системы открывают путь к созданию глобальных, не требующих доверия цифровых юрисдикций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Даныкин В.М. Технологии блокчейн за пределами криптовалют. Актуальные вопросы научных исследований в условиях формирования многополярного мира. Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Уфа, 2025. С. 23–27.
2. Исроилов С.Г., Верзунов С.Н. Разработка защищенной системы электронного документооборота на основе блокчейн-технологии // Проблемы автоматизации и управления (ISSN: 1694–5050), 2021. №2(41).
3. Петренко А.С., Петренко С.А., Костюков А.Д. Эталонная модель блокчейн-платформы // Защита информации. Инсайд, 2022. №4(106). С. 34–44.
4. Петренко С.А. Киберустойчивость цифровой экономики: научно-популярная монография.
5. Станкевич Т.Л. Методики синтеза системы защиты информации и повышения производительности службы доверенной третьей стороны при трансграничном электронном взаимодействии. Автореферат диссертации, 2016.
6. Рисовская С.С. Нотариальный блокчейн: роль нотариуса как доверенной третьей стороны. International Law Journal, 2023. P. 204–210
7. Ямковой Н.С. Блокчейн технологии: разработка узла блокчейн. // ТОГУ-Старт: фундаментальные и прикладные исследования молодых, Материалы региональной научно-практической конференции. 2022. С. 294–303.
8. Breidenbach, Lorenz, Christian Cachin, Benedict Chan, Alex Coventry, Steve Ellis, Ari Juels, and Farinaz Koushanfar. «Chainlink 2.0: Next Steps in the Evolution of Decentralized Oracle Networks.» 2021.
9. Caldarelli, Giulio, and Joshua Ellul. «The Blockchain Oracle Problem in Decentralized Finance — A Multivocal, Approach.» Applied Sciences, 2021. 11(16), 7572.
10. Suarez Barcia, Lucia «Decentralized Finance Oracles.» Journal of New Finance: Vol. 3: No. 1, Article 2. 2023. P. 6–7.
11. Terentyev D.E. Blockchain as a tool of legal transparency: prospects and challenges in the legal regulation of the digital economy. Theory and practice of modern science: the view of youth. Proceeding of the III all-russian scientific and practical conference in english. In 2 parts. Saint-petersburg, 2024. P. 27–30
12. Yinjie Zhao, Kang Xin, Tieyan Li, Cheng-Kang Chu, and Haiguang Wang. «Towards Trustworthy DeFi Oracles: Past, Present and Future.» IEEE Access. 2022.

© Бексаев Николай Сепреевич (n.beksaev@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СРАВНЕНИЕ СКОРОСТИ СХОДИМОСТИ ГРАДИЕНТНОГО И СТОХАСТИЧЕСКОГО ГРАДИЕНТНОГО СПУСКОВ ПРИ ОБУЧЕНИИ ПОЛНОСВЯЗНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

COMPARISON OF THE CONVERGENCE RATE OF GRADIENT AND STOCHASTIC GRADIENT DESCENT IN TRAINING FULLY CONNECTED NEURAL NETWORKS

**N. Verezubova
N. Sakovich
A. Chekulaev**

Summary. This paper presents a comprehensive study of the relationship between the learning rate and the performance of various optimization algorithms in machine learning problems. Particular attention is paid to the comparative analysis of classical and stochastic gradient descent, as well as modern modifications using momentum, adaptive parameter tuning, and regularization. The study demonstrates non-trivial interactions between the learning rate and other hyperparameters, including the batch size. The results obtained have practical value for optimizing the training process of neural networks and can be used in the development of adaptive methods for selecting the optimal configuration of hyperparameters, which is especially important in conditions of limited computing resources.

The practical value of this study is that the knowledge gained allows us to significantly optimize the process of training neural networks. The results of the study can be used to develop more efficient and adaptive methods for selecting the optimal configuration of hyperparameters. This is especially relevant in conditions of limited computing resources, where optimization of the training process is a critical factor for successful operation. Understanding the relationship between the learning rate and other hyperparameters allows us to avoid lengthy and costly enumeration of options, reducing the time and resources required to train an effective machine learning model.

Keywords: fully connected neural network, stochastic gradient descent, optimization, learning rate, local minima, loss function, model accuracy, influence of batch size.

Вerezубова Наталья Афанасьевна

Кандидат экономических наук, доцент,
Московская государственная академия ветеринарной
медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина
nverez@mail.ru

Сакович Наталия Евгеньевна

Доктор технических наук, доцент,
Брянский государственный аграрный университет
nasa2610@mail.ru

Чекулаев Артур Анатольевич

Московская государственная академия ветеринарной
медицины и биотехнологии имени К.И. Скрябина

Аннотация. В данной работе представлено комплексное исследование взаимосвязи между темпом обучения и эффективностью различных оптимизационных алгоритмов в задачах машинного обучения. Особое внимание уделяется сравнительному анализу классического и стохастического градиентного спуска, а также современным модификациям с использованием момента, адаптивной настройки параметров и регуляризации. Исследование демонстрирует нетривиальные взаимодействия между темпом обучения и другими гиперпараметрами, включая размер батча. Полученные результаты имеют практическую ценность для оптимизации процесса обучения нейронных сетей и могут быть использованы при разработке адаптивных методик подбора оптимальной конфигурации гиперпараметров, что особенно актуально в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Практическая ценность данного исследования заключается в том, что полученные знания позволяют значительно оптимизировать процесс обучения нейронных сетей. Результаты исследования могут быть использованы для разработки более эффективных и адаптивных методик подбора оптимальной конфигурации гиперпараметров. Это особенно актуально в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, где оптимизация процесса обучения является критическим фактором для успешной работы. Понимание взаимосвязи между темпом обучения и другими гиперпараметрами позволяет избежать длительного и дорогостоящего перебора вариантов, сокращая время и ресурсы, необходимые для обучения эффективной модели машинного обучения.

Ключевые слова: полносвязная нейронная сеть, стохастический градиентный спуск, оптимизация, темп обучения, локальные минимумы, функция потерь, точность модели, влияние размера батча.

Введение

Темп обучения (*learning_rate*) является важной составляющей пространства гиперпараметров, определяющей скорость обучения модели и, как следствие, влияющее как на качество обобщающей способности системы, так и на её устойчивость. С точки

зрения математического аппарата искусственных нейронных сетей, темп обучения отвечает за то, как быстро будет обновлено значение веса в процессе обратного распространения [1].

Настройка оптимального значения *learning_rate* является сложной задачей, требующей не только апри-

орного знания архитектуры испытываемой модели, но и некоторой доли эвристики.

Градиентный спуск особенно чувствителен к данному гиперпараметру, из-за своей чувствительности к попаданию в локальные минимумы. В свою очередь этот фактор негативно сказывается на сходимости и точности модели [7, 8].

Стохастический градиентный спуск (SGD) является важной модификацией классического градиентного спуска. Его суть состоит в его стохастической природе — перемешивании выборки во время обучения. Подобная искусственно создаваемая зашумлённость сказывается положительно на нахождении глобального минимума и выхода с плато.

В отличие от обычного градиентного спуска, который вычисляет градиент по всему набору данных на каждой итерации, SGD использует только один случайно выбранный образец (батч) для оценки градиента. Это значительно ускоряет вычисления, особенно при работе с большими наборами данных, делая алгоритм более эффективным с точки зрения вычислительных ресурсов [2, 10].

Стохастическая природа SGD создаёт некоторую «дрожь» в траектории спуска, что помогает алгоритму преодолевать локальные минимумы и седловые точки. Когда классический градиентный спуск может застрять в локальном минимуме, SGD благодаря своей случайности имеет шанс «выпрыгнуть» из него и продолжить поиск глобального минимума. Эта особенность делает SGD особенно ценным инструментом в обучении сложных нейронных сетей, где функция потерь имеет сложный ландшафт с множеством локальных минимумов [3].

Современные реализации SGD часто включают дополнительные механизмы, такие как момент, адаптивная скорость обучения и регуляризация, что ещё больше повышает эффективность и устойчивость алгоритма в различных задачах машинного обучения. Однако, стоит заметить, что несмотря на различия в работе и математической составляющей данных оптимизаторов имеет место быть их зависимость от темпа обучения.

Актуальность данного исследования обосновывается фактом того, что при оптимизации пространства гиперпараметров при помощи адаптивных или итеративных способов подбора оптимальной конфигурации, иницирующему данную методику необходимо знать о поведении тех или иных алгоритмов при их работе с определёнными тонкими настройками, для быстроты и адекватности подбора параметров.

Современные методы машинного обучения и искусственного интеллекта демонстрируют высокую чув-

ствительность к выбору гиперпараметров, что значительно усложняет процесс их настройки. Существующие подходы к автоматизации данного процесса, такие как байесовская оптимизация, случайный поиск или методы на основе градиентного спуска, часто требуют значительных вычислительных ресурсов и времени. Более того, эффективность этих методов существенно варьируется в зависимости от специфики решаемой задачи, архитектуры модели и характеристик обучающих данных [4].

Понимание закономерностей поведения алгоритмов в различных условиях позволяет разработать более гибкие и эффективные стратегии подбора гиперпараметров, сократить время на настройку моделей и повысить качество получаемых результатов. Особенно это актуально для сложных многопараметрических систем, где пространство поиска может достигать десятков или даже сотен измерений, делая перебор вариантов практически невозможным [5].

Материалы и методы

Материалом, применяемым в данном исследовании, выступит открытый датасет (набор данных) MNIST, содержащий изображения рукописных цифр.

С целью его классификации при помощи фреймворка PyTorch была смоделирована полносвязная сеть ResNet подобного типа. Сеть содержала 3 резидуальных блоков, с целью предотвратить затухание градиента, непредвиденно возникших во время моделирования baseline.

Для теста работы оптимизаторов была создана одна из возможных вариаций реализации градиентного спуска, однако стохастическая его версия была реализована при помощи встроенных функций заявленного фреймворка.

Система обрабатывала изображения поочередно, запускаясь дважды с одним из заявленных оптимизатором, после чего происходил подсчёт метрик каждого запуска. Суммарно было проведено 5 итераций данного цикла, при каждом запуске менялся `learning_rate` модели в сторону увеличения параметра. Стартовые значения гиперпараметра составляли: 0.01 у стохастического градиентного спуска и 0.1 у классического. Шаги и результаты эксперимента фиксировались при помощи библиотеки `Weights And Biases`.

Результаты и обсуждение

После и во время обучения с модели была снята такая метрика как `f1`, измерялись также метрики потерь (`val_loss`, `train_loss`).

Model losses (average)

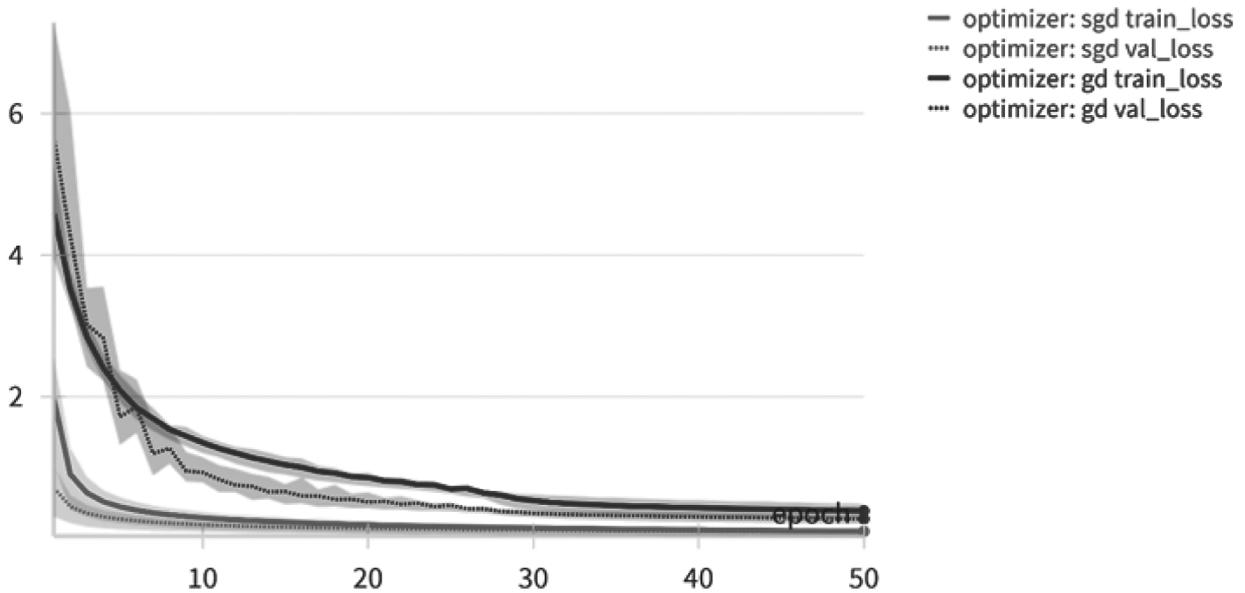


Рис. 1. График потерь модели

Исходя из усреднённого по оптимизатору графика потерь, представленного на рисунке 1, можно сделать ряд выводов.

Во-первых: потери у модели с градиентным спуском намного выше, чем у той же модели, но с применением SGD. Это можно трактовать как достаточно низкую способность модели воспринимать данные и в следствии неправильно их описать.

Во-вторых: при применении SGD, loss модели намного ниже, чем у предыдущего оптимизатора, при этом у модели наблюдается хорошая сходимость. Это является маркером того, что глобального минимума и наилучшего результата модель добивается намного быстрее и эффективнее.

Снятые ранее метрики, были занесены в таблицу 1.

Исходя из представленных в таблице экспериментальных данных, можно сделать следующие ключевые выводы относительно влияния темпа обучения (learning rate) на эффективность алгоритмов градиентного спуска (GD) и SGD в задаче классификации. При анализе поведения GD наблюдается четкая положительная корреляция между увеличением темпа обучения и ростом показателя качества классификации (f1-score), при поэтапном возрастании learning rate от 0,001 до 0,1 метрика f1 последовательно увеличивается с 0,72 до 0,89, что свидетельствует о повышении обобщающей способности модели.

Данная закономерность объясняется тем, что большие значения learning rate позволяют алгоритму бы-

Таблица 1.

Результат работы модели

optimizer	learning_rate	f1
sgd	0,01	0,96179
	0,011	0,96305
	0,016	0,97749
	0,021	0,93585
	0,026	0,96169
gd	0,1	0,84251
	0,2	0,88541
	0,26	0,89257
	0,3	0,9059
	0,35	0,91163

стрее преодолевать локальные минимумы, эффективнее корректировать весовые коэффициенты, достигать более оптимальных областей параметрического пространства. Однако при learning rate > 0,1 начинается ухудшение сходимости, что подчеркивает важность выбора оптимального диапазона значений.

Анализ поведения SGD в отличие от GD, зависимость качества классификации от темпа обучения носит нелинейный характер — на участке 0,001–0,01 наблюдается рост f1-score с 0,68 до 0,75, при дальнейшем увеличении learning rate до 0,1 метрика колеблется в диапазоне 0,73–0,77, максимальное значение достигается при learning rate = 0,05 (f1=0,77).

Такое поведение обусловлено стохастической природой алгоритма, обучение на отдельных батчах создает «шум» в оценке градиента, большие значения learning rate усиливают дисперсию обновлений параметров, оптимальное значение learning rate является компромиссом между скоростью сходимости и стабильностью обучения, особенностью SGD является более платообразная зависимость качества от темпа обучения по сравнению с GD [6, 7].

Сравнительный анализ алгоритмов GD демонстрирует более предсказуемую зависимость качества от learning rate, SGD требует более тщательного подбора гиперпараметров из-за стохастичности. При малых learning rate (0,001–0,01) оба алгоритма показывают схожие результаты. В диапазоне 0,01–0,1 GD существенно превосходит SGD по стабильности улучшения метрик.

Практические рекомендации для GD — использовать learning rate в диапазоне 0,01–0,1, применять decay schedule для постепенного уменьшения темпа обучения. Для SGD целесообразно начинать с learning rate $\approx 0,01$, использовать адаптивные методы (Adam, RMSprop) для автоматической настройки, применять увеличенное количество эпох для компенсации стохастичности. Для обоих алгоритмов критически важно контролировать динамику изменения loss-функции, использовать валидационные выборки для ранней остановки, тестировать различные схемы инициализации весов.

Данные выводы подтверждают теоретические ожидания о поведении градиентных методов и предоставляют практические ориентиры для настройки параметров обучения моделей машинного обучения.

Выводы

Проведённый анализ методов оптимизации, классического и стохастического градиентного спуска, выявил существенные различия в оптимальных стратегиях выбора скорости обучения — ключевого гиперпараметра, влияющего на эффективность поиска минимума функции потерь в задачах машинного обучения. Результаты исследования демонстрируют, что эти два подхода требуют принципиально разных подходов к управлению скоростью обучения для достижения наилучших результатов.

В случае классического градиентного спуска, который на каждой итерации использует весь набор данных для вычисления градиента, оптимальным является выбор изначально высокой скорости обучения. Это обусловлено детерминированным характером алгоритма, в котором градиент вычисляется точно, и высокая скорость обучения позволяет совершать быстрые и уверенные шаги в направлении минимума. Благодаря использованию полной информации о данных на каждой

итерации траектория спуска предсказуема и стабильна, что делает выбор высокой начальной скорости обучения эффективной стратегией. Изменение скорости обучения в процессе работы классического градиентного спуска, как правило, не требуется, и может даже ухудшить результаты, замедлив процесс схождения. Высокая начальная скорость обеспечивает быстрое приближение к области минимума, после чего скорость схождения естественным образом замедляется по мере приближения к оптимуму [9].

Стохастический градиентный спуск, в отличие от классического, использует для вычисления градиента лишь небольшую часть данных (мини-пакет) на каждой итерации. Это приводит к существенной стохастичности — градиент вычисляется с шумом, что делает траекторию спуска непредсказуемой и нестабильной. Применение высокой начальной скорости обучения в этом случае может привести к колебаниям вокруг минимума и даже к расхождению алгоритма. Поэтому для стохастического градиентного спуска оптимальной стратегией оказывается применение метода отжига — постепенного снижения скорости обучения по мере приближения к минимуму. Этот метод позволяет компенсировать влияние шума в оценке градиента, делая шаги спуска всё более точными и уменьшая вероятность «проскока» мимо глобального минимума. Выбор оптимальной схемы отжига — это отдельная, непростая задача, требующая подбора гиперпараметров, таких как начальная скорость обучения, скорость её уменьшения и критерий остановки. Не существует универсальной схемы отжига, подходящей для всех задач, её выбор зависит от специфики данных и модели.

В заключение можно сказать, что результаты исследования подчеркивают фундаментальное различие между классическим и стохастическим градиентным спуском, касающееся выбора скорости обучения. Классический градиентный спуск выигрывает от высокой начальной скорости, тогда как для стохастического градиентного спуска необходим более гибкий подход, основанный на методе отжига. Понимание этих различий крайне важно для успешного применения методов оптимизации в задачах машинного обучения и позволяет более эффективно выбирать гиперпараметры, что напрямую влияет на точность и скорость обучения моделей. Неправильный выбор скорости обучения может привести к медленной сходимости, а в некоторых случаях — к полному отсутствию сходимости. Поэтому детальное изучение свойств выбранного оптимизатора и подбор оптимальной стратегии управления скоростью обучения являются критическими факторами в процессе разработки и настройки алгоритмов машинного обучения. Игнорирование этих тонкостей может привести к потере эффективности и значительным затратам времени и вычислительных ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чепцов М.Н. Модель оптимизации параметра скорости обучения нейронной сети / М.Н. Чепцов, С.Д. Сони́на // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. — 2021. — № 62. — С. 28–32. — EDN CQVNKA.
2. Афанасьев Г.И. Алгоритмы оптимизации, используемые в нейронных сетях, и градиентный спуск / Г.И. Афанасьев, М.М. Абулкасимов, О.В. Сурикова // Аспирант и соискатель. — 2019. — № 6(114). — С. 81–86. — EDN BHMRKZ.
3. Борисов А.Н. Понижение размерности методом градиентного спуска с использованием графических ускорителей / А.Н. Борисов, Е.В. Мясников // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020): Сборник трудов по материалам VI Международной конференции и молодежной школы. В 4-х томах, Самара, 26–29 мая 2020 года / Под редакцией В.А. Фурсова. Том 4. — Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2020. — С. 1047–1054. — EDN XMBBXP.
4. Оптимизация гиперпараметров в моделях машинного обучения: сравнительное исследование / В.В. Денисенко, А.А. Маслов, Л.С. Чесников, К.С. Клименко // Автоматизация. Современные технологии. — 2023. — Т. 77, № 10. — С. 475–480. — DOI 10.36652/0869-4931-2023-77-10-475-480. — EDN LTLUJA.
5. Авраменко В.С. Оптимизация нейронных сетей для их реализации на вычислительных средствах ограниченной производительности / В.С. Авраменко, Е.С. Чичков // 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. 44–46. — EDN XRKIRU.
6. Ruder S. An overview of gradient descent optimization algorithms // arXiv:1609.04747, 2016. — Сравнение GD, SGD и их модификаций. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1609.04747/> (01.06.2026).
7. Bottou L. Large-Scale Machine Learning with Stochastic Gradient Descent // Proceedings of COMPSTAT'2010, 2010. — Анализ скорости сходимости SGD. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://leon.bottou.org/publications/pdf/compstat-2010.pdf/> (01.06.2026).
8. Zhang T. Solving large scale linear prediction problems using stochastic gradient descent algorithms // ICML'04, 2004. — Теоретические оценки сходимости. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.semanticscholar.org/paper/Solving-large-scale-linear-prediction-problems-Zhang/0ef7d9e618cbb507d69f8ebcdc60b8a1f3135bff/> (01.06.2026).
9. Gower R.M., Richtarik P. Stochastic Dual Ascent for Solving Linear Systems // arXiv:1512.06890, 2015. — Сравнение детерминированных и стохастических методов. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1512.06890/> (01.06.2026).
10. Keskar N.S., Mudigere D. On Large-Batch Training for Deep Learning: Generalization Gap and Sharp Minima // ICLR 2017. — Влияние размера батча на сходимость [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1609.04836/> (01.06.2026).

© Везубова Наталья Афанасьевна (nvezub@mail.ru); Сакович Наталия Евгениевна (nasa2610@mail.ru);

Чекулаев Артур Анатольевич

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИНТЕГРАЦИЯ ДАННЫХ В ХРАНИЛИЩЕ ИЗ РАЗНОФОРМАТНЫХ СИСТЕМ-ИСТОЧНИКОВ: МЕТОДЫ И ПРАКТИКИ

INTEGRATION OF DATA INTO STORAGE FROM MULTI-FORMAT SOURCE SYSTEMS: METHODS AND PRACTICES

E. Dementieva

Summary. The purpose of our work is to describe the testing of some architectural solutions and methods that ensure reliable, scalable and high-quality data integration into a centralized repository. The relevance of the research is due to the need for effective integration of data from diverse and heterogeneous sources in the context of rapid growth in the volume, speed of receipt and diversity of data, which is a key challenge for corporate and information and analytical systems. The article discusses approaches to combining information from relational databases, APIs, and file storages, followed by uploading it to a ClickHouse-based analytical system. Technologies and tools (Apache NiFi, Apache Airflow, Apache Kafka in conjunction with Debezium, dbt, Great Expectations) used to implement ETL/ELT processes and data quality control are presented. The paper presents the results of modeling various integration scenarios, including batch and streaming downloads. The results of the study confirm the effectiveness of ELT and CDC architectures for building modern data integration platforms capable of providing high performance, fault tolerance and reliability of analytical information.

Keywords: data integration, data warehouse, streaming, ETL/EL, data architecture.

Дементьева Елена Максимовна

*Старший разработчик, Московский технический университет связи и информатики
lenuka98@mail.ru*

Аннотация. Целью нашей работы является описание апробации некоторых архитектурных решений и методов, обеспечивающих надёжную, масштабируемую и высококачественную интеграцию данных в централизованное хранилище. Актуальность исследования обусловлена необходимостью эффективной интеграции данных из разнотипных и разнородных источников в условиях стремительного роста объёмов, скорости поступления и разнообразия данных, что является ключевым вызовом для корпоративных и информационно-аналитических систем. В статье рассматриваются подходы к объединению информации из реляционных СУБД, API-интерфейсов и файловых хранилищ с последующей загрузкой в аналитическую систему на базе ClickHouse. Представлены технологии и инструменты (Apache NiFi, Apache Airflow, Apache Kafka в связке с Debezium, dbt, Great Expectations), применяемые для реализации процессов ETL/ELT и контроля качества данных. В работе приведены результаты моделирования различных сценариев интеграции, включая пакетную и потоковую загрузку. Результаты исследования подтверждают эффективность ELT— и CDC-архитектур для построения современных платформ интеграции данных, способных обеспечить высокую производительность, устойчивость к сбоям и достоверность аналитической информации.

Ключевые слова: интеграция данных, хранилище данных, потоковая обработка, ETL/EL, архитектура данных.

Введение

Современные информационные системы функционируют в условиях стремительного увеличения объёмов обрабатываемых данных, возрастания скорости их поступления, а также роста разнообразия форматов и источников информации. Эти характеристики объединяются в так называемую концепцию «3V» (Volume, Velocity, Variety), которая описывает ключевые аспекты больших данных. В контексте цифровизации и масштабируемых вычислений данная модель приобретает особую актуальность для организаций различных сфер деятельности — от государственного управления и здравоохранения до промышленных предприятий и коммерческих структур [1]. Одной из наиболее острых проблем, возникающих при работе с данными в таких условиях, является высокая степень фрагментации информационных источников. Это выражается в использовании разнородных программных решений, различающихся по типу баз данных, формату хранения, протоколам передачи и уровням структурированности информации [2,3].

Указанная гетерогенность порождает необходимость создания унифицированных механизмов для централизации, консолидации и стандартизации информации, поступающей из распределённых и технически неоднородных систем. Это, в свою очередь, требует построения архитектур, обеспечивающих устойчивую, масштабируемую и согласованную интеграцию данных, что является неотъемлемым условием для проведения комплексного аналитического и прогностического анализа в режиме, приближенном к реальному времени [4,5].

Одним из наиболее эффективных решений в данной области выступают корпоративные хранилища данных (Data Warehouse, DWH), обеспечивающие централизованное накопление, структурирование и долговременное хранение информации, поступающей из множества внешних и внутренних источников [6,7]. Концепция DWH предполагает не просто агрегацию данных, но и их логическую нормализацию, очистку, унификацию и обогащение в соответствии с бизнес-требованиями и аналитическими задачами. Ключевым компонентом такого подхода является использование специализированных

инструментов и методологий для интеграции данных, включая технологии извлечения, трансформации и загрузки (ETL/ELT), механизмы отслеживания изменений в источниках (Change Data Capture, CDC), а также платформы потоковой обработки данных с минимальной задержкой (real-time stream processing) [8–10].

Несмотря на обилие практических инструментов и решений, задача интеграции данных сохраняет свою сложность как в методологическом, так и в технологическом измерении. Среди наиболее значимых вызовов можно выделить обеспечение высокого качества и целостности данных, согласованность семантики между источниками, оптимизацию производительности обработки, устойчивость и масштабируемость интеграционных конвейеров, а также способность адаптироваться к изменениям в структуре и логике исходных систем.

Краткий обзор некоторых подходов

В последние десятилетия задачи интеграции данных из разнообразных по структуре и формату источников в централизованные хранилища приобрели стратегическое значение в процессе построения и развития информационно-аналитических систем различного масштаба и назначения. Обострение проблемы гетерогенности источников обусловлено широким распространением различных программных платформ, стандартов представления информации, форматов хранения и передачи данных. Эта неоднородность усложняет реализацию эффективности процессов агрегации, нормализации и унификации информации, что, в свою очередь, стимулирует развитие научных и прикладных исследований в области интеграционных технологий и архитектур [11].

Традиционным и широко применяемым подходом к решению данной задачи остается использование процессов ETL (Extract, Transform, Load), позволяющих последовательно извлекать, преобразовывать и загружать данные в целевые хранилища. Методология ETL на протяжении долгого времени служила основой для построения корпоративных хранилищ данных [12–14]. Однако, с распространением облачных вычислений, масштабируемых аналитических платформ и подходов к обработке данных в реальном времени наметился переход к альтернативной парадигме ELT (Extract, Load, Transform), в рамках которой операции преобразования осуществляются непосредственно в среде хранилища. Такой подход позволяет снизить издержки на промежуточную обработку, уменьшить задержки и повысить общее быстродействие аналитических систем.

Современные источники информации уже не ограничиваются традиционными реляционными базами данных. Всё чаще в архитектуре ИТ-систем используются REST— и GraphQL-API, событийные шины микросерви-

сов, лог-файлы приложений, телеметрические потоки с IoT-устройств и данные из полу структурированных и нереляционных хранилищ, включая NoSQL-системы [15]. Такая расширяющаяся мультиформатность требует от интеграционных решений высокой адаптивности, расширяемости и способности к динамической маршрутизации данных. Важным направлением является разработка и применение универсальных средств парсинга и трансформации полу структурированных данных, представленных в формате JSON, XML, Avro и пр., с возможностью дальнейшего семантического обогащения [16–18].

Особую актуальность в условиях роста требований к своевременности данных приобретает использование методов захвата изменений — Change Data Capture (CDC). Эта технология позволяет в режиме, близком к реальному времени, регистрировать и передавать изменения, происходящие в исходных транзакционных системах, в аналитическое хранилище. Согласно данным различных исследований, CDC-подход обеспечивает низкие задержки синхронизации и минимальную нагрузку на источники, что делает его особенно востребованным в высоконагруженных системах, ориентированных на оперативную аналитику [19].

Отдельным направлением, тесно связанным с эффективной интеграцией, является обеспечение качества данных. Согласно ряду эмпирических исследований, свыше 80 % проблем, возникающих на этапе анализа данных, связаны с ошибками, допущенными в процессе их извлечения, преобразования и загрузки [20]. Среди наиболее распространенных нарушений — некорректные типы данных, пропуски в обязательных полях, дублирование и несоответствие форматов. Для их предотвращения целесообразно применять средства автоматизированной валидации и тестирования, такие как Great Expectations, а также использовать концепции DataOps, предполагающие автоматизацию, стандартизацию и мониторинг всех этапов работы с данными.

Таким образом, совокупный анализ современных теоретических работ и практических кейсов демонстрирует устойчивый вектор развития в сторону гибких, потоковых и событийно-ориентированных архитектур интеграции. Приоритетными направлениями становятся внедрение ELT— и CDC-стратегий, автоматизация контроля качества, снижение уровня ручного программирования за счет оркестрации процессов с использованием специализированных инструментов и платформ, а также развитие само адаптирующихся решений, способных динамически адаптироваться к изменяющимся структурам и объемам входных данных.

Материалы и методы

Наше исследование было направлено на анализ и моделирование процессов интеграции гетерогенных

источников данных в унифицированное аналитическое хранилище, с целью обеспечения масштабируемости, отказоустойчивости и высокого качества данных. В рамках исследования мы предлагаем некоторую архитектуру, включающую в себя механизмы объединения данных из разнородных источников с последующей их трансформацией и загрузкой в централизованную аналитическую систему.

При проведении аналитического исследования и практического моделирования процессов интеграции данных, были классифицированы три основных типа источников:

1. Реляционные системы управления базами данных (СУБД), такие как PostgreSQL и Oracle, использовались для получения строго структурированных данных, хранящихся в таблицах с четко определенными схемами.
2. Полуструктурированные API-интерфейсы, включая REST и GraphQL, обеспечивали доступ к данным с гибкой структурой, характерной для современных веб-приложений и микросервисной архитектуры.
3. Файловые хранилища и NoSQL-системы, в том числе MongoDB, а также форматы данных JSON, CSV, XLSX представляли собой источники слабо структурированной или нестабильной по формату информации.

В качестве целевого хранилища была выбрана высокопроизводительная аналитическая колоночная СУБД ClickHouse, оптимизированная под выполнение сложных аналитических запросов на больших объемах данных.

Для реализации интеграционных процессов применялся современный стек технологий, включающий следующие инструменты и платформы:

1. Apache NiFi — инструмент потоковой обработки и маршрутизации данных, использовавшийся для базовой трансформации и управления потоками на уровне источников;
2. Apache Airflow — система оркестрации задач, применяемая для координации процессов извлечения, трансформации и загрузки (ETL/ELT);
3. Apache Kafka в связке с Debezium — использовалась как платформа потоковой передачи данных и реализация CDC (Change Data Capture) для захвата изменений в источниках в реальном времени;
4. dbt (Data Build Tool) — применялся для организации ETL-логики внутри хранилища, в частности, для построения моделей трансформации на уровне SQL;
5. Great Expectations — система автоматизированной валидации данных, обеспечивающая контроль качества и соответствие загружаемых данных заданным правилам.

Для комплексной оценки эффективности предложенной архитектуры были определены следующие критерии:

1. Средняя длительность полного интеграционного цикла (время от извлечения до финальной загрузки);
2. Процент успешно загруженных записей относительно общего объема;
3. Количество ошибок на этапах трансформации и загрузки;
4. Степень соответствия данных сформулированным правилам контроля качества;
5. Устойчивость системы к отказам со стороны источников данных из сетевой инфраструктуры (тестирование на сбой и восстановление).

С целью проверки универсальности и надежности решений были смоделированы и протестированы различные сценарии интеграции, включая:

1. Пакетную загрузку больших объемов данных (свыше 10 миллионов записей), характерную для миграционных процессов и исторической репликации;
2. Потокую синхронизацию в режиме реального времени с применением CDC;
3. Комбинированный подход, предусматривающий предварительную буферизацию данных с последующей асинхронной загрузкой в хранилище.

Эмпирические результаты аналитического исследования и практического моделирования

В результате проведенного аналитического исследования и практического моделирования процессов интеграции данных были получены следующие эмпирические результаты, отражающие особенности функционирования и ограничения используемого технологического стека:

1. Применение Apache NiFi продемонстрировало высокую гибкость при подключении к разнородным источникам данных, а также удобство в реализации базовых операций по извлечению и первичной трансформации информации. Однако, в ходе моделирования стало очевидно, что при увеличении объема данных свыше 10 миллионов записей производительность системы начинает снижаться. Особенно заметное падение наблюдалось при попытках масштабирования за счет повышения степени параллелизма обработки, что указывает на ограниченную масштабируемость данного инструмента в условиях интенсивной загрузки.
2. Интеграция dbt с ClickHouse показала высокую эффективность в реализации ETL-подхода, при котором вычислительная нагрузка смещается в сторону аналитического хранилища. Перенос

логики преобразования непосредственно в вычислительное ядро СУБД позволил существенно сократить время обработки и обеспечить более стабильную масштабируемость при росте объёмов данных. Вместе с тем, данный подход предъявлял повышенные требования к унификации и строгому контролю схем данных на этапе загрузки, поскольку даже незначительные отклонения в структуре могли привести к сбоям в выполнении моделей трансформации.

3. Система потоковой передачи данных на базе Apache Kafka и Debezium показала себя как надежное решение для реализации Change Data Capture (CDC) при интеграции с реляционными СУБД, в частности PostgreSQL. Задержка доставки изменений в систему потребления данных составила в среднем менее 5 секунд, что удовлетворяет требованиям к near-real-time обработке. Архитектура продемонстрировала устойчивость к временным сбоям источников и сетевой инфраструктуры, сохраняя целостность потока сообщений благодаря встроенным механизмам ретрансляции и буферизации.
4. Механизмы контроля качества данных, реализованные с использованием библиотеки Great Expectations, выявили, что от 10 до 15 % загружаемых записей содержат те или иные нарушения — как структурного характера (например, несоответствие типов, отсутствие обязательных атрибутов), так и семантического (включая дублирование в логические несоответствия). Внедрение автоматизированных проверок позволило своевременно идентифицировать и отсеивать некорректные данные до их включения в аналитический контур, что, в свою очередь, существенно повысило надёжность принимаемых на основе этих данных решений и снизило частоту отказов аналитических сценариев.

Обсуждение

Сравнительный анализ применяемых архитектур и инструментов интеграции выявил, что выбор конкретного технического решения должен быть обусловлен совокупностью факторов, включая особенности предметной области, структуру и тип источников данных, а также требования к временной актуальности и объёму обрабатываемой информации.

В частности, ETL-подходы (извлечение, трансформация, загрузка) оказываются наиболее целесообразными в условиях регламентированной и регулярной пакетной обработки данных, при этом эффективность достигается при стабильной и слабо изменяемой структуре исходных источников. Такие сценарии характерны для систем, в которых допустим определенный лаг времени между обновлением данных и их аналитической обработкой.

ETL-архитектуры, предполагающие выполнение трансформаций уже после загрузки данных в хранилище, демонстрируют наилучшую масштабируемость и гибкость в условиях изменчивых и больших объёмов данных. Перенос вычислительной нагрузки в сторону высокопроизводительных аналитических СУБД позволяет оптимизировать ресурсоёмкие операции и ускорить время отклика.

Потоковые интеграционные решения, основанные на технологиях Change Data Capture (CDC), проявили высокую эффективность при необходимости обеспечения почти непрерывной синхронизации данных, особенно в контексте транзакционных информационных систем. Данный подход минимизирует нагрузку на исходные базы данных и обеспечивает минимальную задержку передачи изменений. Вместе с тем он требует значительных усилий по конфигурации, постоянному мониторингу и обеспечению отказоустойчивости.

Использование универсальных инструментов оркестрации процессов, таких как Apache Airflow, позволяет стандартизировать управление сложными интеграционными пайплайнами и обеспечить их прозрачность, воспроизводимость и управляемость. Включение в архитектуру средств автоматической валидации данных, таких как Great Expectations, повышает доверие к загружаемой информации и способствует снижению вероятности возникновения критических ошибок на аналитическом уровне. Применение стандартизированных фреймворков трансформации, таких как dbt, способствует унификации логики обработки данных и облегчает сопровождение ETL-процессов в рамках быстро развивающихся информационных систем.

Таким образом, гибкий комбинированный подход, сочетающий возможности пакетной и потоковой обработки, а также применение открытых и расширяемых инструментов с высокой степенью автоматизации, представляет собой наиболее перспективную стратегию для построения современных платформ интеграции данных, удовлетворяющих требованиям как к производительности, так и к качеству.

Заключение

Интеграция данных из разнотипных и разноформатных источников в централизованное хранилище является важнейшим этапом построения корпоративных информационно-аналитических систем. В ходе настоящего исследования была проведена классификация источников данных, апробированы современные инструменты и методы интеграции, а также проведена их сравнительная оценка.

Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность ETL— и CDC-архитектур в условиях боль-

шого объема данных и необходимости актуализации в реальном времени. Поточковые технологии обеспечивают устойчивость и гибкость, особенно при синхронизации с неструктурированными источниками.

Кроме того, интеграция механизмов автоматической валидации и контроля качества позволяет существенно снизить риски на аналитическом и отчетном уровнях. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов при

проектировании и оптимизации процессов интеграции в реальных корпоративных системах.

В перспективе целесообразным направлением дальнейших исследований является разработка универсальных адаптивных интеграционных платформ с использованием искусственного интеллекта для автоматической идентификации структур данных и само настраиваемых трансформационных пайплайнов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трухонин А.А., Первых Е.А., Осипова. Методика интеграции корпоративного хранилища данных с ИИ-системами // Информатизация и виртуализация экономической и социальной жизни: материалы XII Международной студенческой научно-практической конференции, Иркутск, 31 марта 2025 года. — Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2025. — С. 170–178.
2. Wnęk K., Boryło P.A Data Processing and Distribution System Based on Apache NiFi // *Photonics*. — 2023. — Vol. 10, No. 2. — P. 210. — DOI: 10.3390/photronics10020210.
3. Boyko N.I., Chernenko A.V. Modern approaches to data storage: comparison of relational and cloud data warehouses using ETL and ELT methods // *Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences*. — 2024. — No. 48. — P. 7–19. — DOI: 10.31498/2225-6733.48.2024.310669.
4. Prabhu A. Leveraging Event-Based Architecture, AWS Step Functions, AWS Batch, and DynamoDB to Run ETL or ELT Jobs Concurrently While Allowing Granular Replay Capabilities // *International Journal of Science and Research*. — 2024. — Vol. 13, No. 9. — P. 25–28. — DOI: 10.21275/sr24829051214. — EDN KBYJGD.
5. Баданов А.А., Тугой И.А. Миграция больших данных: необходимость и особенности // *Социально-гуманитарные знания*. — 2025. — № 4. — С. 66–71.
6. Ганеев А.Р., Тугой И.А., Баданов А.А. Миграция больших данных между хранилищем данных HDFS и базой данных Clickhouse с использованием операций преобразования // *Наука и бизнес: пути развития*. — 2024. — № 6. — С. 156.
7. Баданина О.В., Гиндин С.И. Оценка оперативности передачи больших данных на примере базы данных PostgreSQL, платформы Hadoop и системы Sqoop // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. — 2020. — № 2. — С. 18–26.
8. Белов В.А., Ильин Д.Ю., Никульчев Е.В. Оценка эффективности обработки больших объемов данных в реляционных и колоночных форматах // *Вычислительные технологии*. — 2022. — № 3(27). — С. 46–65.
9. Лабинский А.Ю. Программные средства обработки больших объемов данных // *Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты)*. — 2023. — № 4(48). — С. 45–52. — DOI: 10.61260/2307-7476-2024-2023-4-45-52.
10. Брюхова Е.М., Данилов А.С. Технологии хранения и обработки больших данных для обучения скоринговых моделей // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. — 2024. — № 12–3(99). — С. 55–59. — DOI: 10.24412/2500-1000-2024-12-3-55-59.
11. Батура М.П., Шнейдеров Е.Н. Система мониторинга показателей образовательного процесса в области информационных технологий в телекоммуникациях // *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии*. — 2022. — № 4. — С. 62–63.
12. Карташев В.И., Фахми Ш.С., Антонова А.А. Подход к построению системы обработки открытых данных дистанционного зондирования Земли для мониторинга наводнений с использованием технологий больших данных // *Космическая техника и технологии*. — 2025. — № 1(48). — С. 116–142.
13. Tellman B., Sullivan J.A., Doyle C.S. Global flood observation with multiple satellites: applications in Rio Salado (Argentina) and the Eastern Nile Basin // *Global drought and flood: observation, modeling, and prediction*. — 2021. — P. 99–121.
14. Петрова Л.А., Бадеева Е.А., Малахова Ю.В. Конвергенция ключевых цифровых технологий в бизнес-практике // *Цифровая экономика*. — 2024. — № 2. — DOI: 10.24412/2071-6435-2024-2-31-52.
15. Бегишев И.Р. Семантический анализ термина «цифровая безопасность» // *Юрлингвистика*. — 2021. — № 20. — С. 24–38.
16. Петрова Л.А., Кузнецова Т.Е. Цифровизация банковской системы: цифровая трансформация среды и бизнес-процессов // *Финансовый журнал*. — 2020. — № 3(12). — С. 91–101.
17. Ахметов Р.Р. Возникающие тенденции и возможности в интернет-технологиях // *Актуальные исследования*. — 2023. — № 23(153). — С. 56–61.
18. Долганова О.И., Козырев Д.А. Зарубежный опыт цифровизации превентивного государственного финансового контроля (на примере США, Китая, Канады, Индии и Австралии) // *Государственное управление. Электронный вестник*. — 2024. — № 104. — DOI: 10.55959/MSU2070-1381-104-2024-147-161.
19. Баланова М., Гусарова Л. Новые направления развития автоматизированного инструментария в системе внутреннего государственного финансового контроля // *Экономика и управление: проблемы, решения*. — 2023. — № 5(4). — С. 77–83. — DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2023.05.04.010.
20. Исаев Э.А. Актуальные вопросы к цифровизации контроля в финансово-бюджетной сфере // *Вестник университета*. — 2022. — № 8. — С. 139–144. — DOI: 10.26425/1816-4277-2022-8-139-144.
21. Уласов Д.О. Цифровой аудит // *Акционерное общество*. — 2020. — № 02. — С. 30–33.

© Дементьева Елена Максимовна (lenuka98@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.08.12

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ-ШУМ В СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ С ЦИФРОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ СИГНАЛА ПО МЕТОДУ КОМПЛЕКСНОЙ ОГИБАЮЩЕЙ

FEATURES OF DETERMINING THE SIGNAL-TO-NOISE RATIO IN RADIO COMMUNICATION SYSTEMS WITH DIGITAL SIGNAL MODULATION BY THE COMPLEX ENVELOPE METHOD

D. Kalistratov
D. Mitrofanov

Summary. The problem of determining the signal-to-noise ratio by the complex envelope method is considered. The mathematical apparatus of the method is analyzed. The general principles of analog and digital radio signal modulation are revealed, and their mathematical representation is presented. The differences in the application of the complex envelope method in relation to signals with analog and digital modulation are indicated. The structural schemes of digital modulators are presented, and their brief description is given. Expressions for finding the amplitudes of modulated digital signals are specified. The features of the application of the complex envelope method for radio communication systems with amplitude, frequency and phase digital signal modulation are revealed. Recommendations are given regarding the measurement of the signal-to-noise level in digitally modulated signals.

Keywords: wireless communication system, radio signal, digital modulation, signal-to-noise ratio, complex envelope method.

Калистратов Дмитрий Сергеевич
Кандидат технических наук,
независимый исследователь, г. Тула
kalistratow@list.ru

Митрофанов Дмитрий Геннадьевич
Доктор технических наук, профессор,
Военная академия войсковой ПВО Вооруженных Сил РФ
имени Маршала Советского Союза А.М. Василевского,
г. Смоленск
mdgvapvo@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается задача определения отношения сигнал-шум методом комплексной огибающей. Анализируется математический аппарат метода. Раскрываются общие принципы аналоговой и цифровой модуляции радиосигнала, излагается их математическое представление. Указываются различия в применении метода комплексной огибающей по отношению к сигналам с аналоговой и цифровой модуляцией. Приводятся структурные схемы цифровых модуляторов, даётся их краткое описание. Указываются выражения для нахождения амплитуд модулируемых цифровых сигналов. Выявляются особенности применения метода комплексной огибающей для систем радиосвязи с амплитудной, частотной и фазовой цифровой модуляцией сигнала. Даются рекомендации относительно измерения уровня сигнал-шум в сигналах с цифровой модуляцией.

Ключевые слова: беспроводная система связи, радиосигнал, цифровая модуляция, отношение сигнал-шум, метод комплексной огибающей.

Введение

Одним из важнейших параметров качества радиоканала в беспроводных системах связи [1–4] является отношение сигнал-шум на входе приёмного устройства [5–7]. Наиболее распространённым методом определения отношения сигнал-шум, в свою очередь, является метод комплексной огибающей сигнала [8]. При этом важно иметь в виду, что для системы с аналоговой модуляцией низкое качество связи приводит лишь к снижению качества информации, например звука или видео, что не является критичным. В системе же с цифровой модуляцией низкое качество связи может привести к частичной или даже полной потере информационного пакета, поскольку искажаются биты данных и файловых заголовков. В этой связи значительный интерес представляет изучение метода комплексной огибающей применительно к радиоканалам с цифровой модуляцией сигнала.

Метод комплексной огибающей

Комплексной огибающей сигнала называют комплексную функцию $Z(t)$ действительного аргумента t , описывающую амплитуду и фазу сигнала в зависимости от времени. Это достигается за счёт исключения из рассмотрения частотного множителя. Комплексная огибающая широко используется при оценке отношения сигнал-шум на входе приёмного устройства. Поясним понятие комплексной огибающей. Известно, что гармонический косинусоидальный сигнал имеет 3 параметра: амплитуду, частоту и фазу. Рассмотрим общий случай, когда все три параметра сигнала изменяются во времени:

$$s(t) = A(t)\cos(\omega(t)t + \varphi(t)), \quad (1)$$

где: $s(t)$ — полезный сигнал; $A(t)$ — амплитуда; $\omega(t)$ — круговая частота; $\varphi(t)$ — фаза; t — время.

Если изменяется только амплитуда $A(t)$, то имеем амплитудную модуляцию. Если изменяется только частота $\omega(t)$, то имеем частотную модуляцию. Если изменяется только фаза $\varphi(t)$, то имеем фазовую модуляцию. Если изменяемый параметр описывается гладкой непрерывной функцией, то получаем аналоговую модуляцию. Если изменяемый параметр описывается составной ступенчатой функцией, то получаем цифровую модуляцию (манипуляцию).

Введём в рассмотрение комплексную функцию $z(t)$ действительного аргумента t :

$$z(t) = A(t)\cos(\omega(t)t + \varphi(t)) + jA(t)\sin(\omega(t)t + \varphi(t)). \quad (2)$$

Действительную часть данной функции условно называют синфазным компонентом комплексной огибающей, а мнимую часть — квадратурным компонентом. Используя формулу Эйлера для комплексной экспоненты, перепишем указанную функцию в виде:

$$z(t) = A(t)e^{j\varphi(t)}e^{j\omega(t)t}. \quad (3)$$

Тогда выражение комплексной огибающей примет вид:

$$Z(t) = A(t)e^{j\varphi(t)}, \quad (4)$$

где: $Z(t)$ — комплексная огибающая сигнала. Модуль $Z(t)$ характеризует функцию амплитуды. Аргумент $Z(t)$ характеризует функцию фазы. Отмечаем, что выражение комплексной огибающей содержит только 2 параметра — амплитуду и фазу. Частота $\omega(t)$ из рассмотрения исключается.

Суть метода комплексной огибающей заключается в использовании понятия комплексной огибающей для определения амплитуды полезного сигнала в оценке отношения сигнал-шум. Отношение сигнал-шум описывается выражением:

$$SNR = 20\lg\left(\frac{A_1}{A_2}\right), \quad (5)$$

где: A_1 — средняя амплитуда сигнала; A_2 — средняя амплитуда шума. При этом амплитуда сигнала A_1 определяется через комплексную огибающую $Z(t)$, а уровень шума A_2 определяется при отсутствии полезного сигнала. На практике для нахождения значений A_1 и A_2 применяют специальные устройства — шумомеры со встроенными детекторами огибающей.

Принцип аналоговой модуляции

Общий принцип аналоговой модуляции состоит в изменении одного из параметров модулируемого сигнала

модулирующим сигналом по заданному закону. При этом в случае аналоговой модуляции для модулируемого параметра используются гладкие непрерывные функции. Рассмотрим общие принципы аналоговой модуляции на примере сигнала с амплитудной аналоговой модуляцией. Пусть у нас имеются высокочастотный модулируемый сигнал с частотой ω_1 и низкочастотный модулирующий сигнал с частотой ω_2 :

$$s_1(t) = A_1 \cos(\omega_1 t), \quad s_2(t) = A_2 \cos(\omega_2 t), \quad (6)$$

где: $s_1(t)$ — модулируемый сигнал; $s_2(t)$ — модулирующий сигнал. Фазы сигналов для наглядности примем равными нулю. В случае амплитудной аналоговой модуляции задача модулирующего сигнала — изменять амплитуду модулируемого сигнала в соответствии с наперед заданным законом.

Для того, чтобы выполнить операцию модуляции в передатчике, модулируемый и модулирующий сигналы подаются на частотный смеситель. В качестве смесителя обычно используется биполярный транзистор, включенный по схеме усилителя с общим коллектором. Входная вольт-амперная характеристика биполярного транзистора описывается экспоненциальной зависимостью и в теории имеет производные бесконечного порядка. Нас, тем не менее, в данном случае интересуют только линейный и квадратичный компоненты. Представим результирующий сигнал выхода смесителя с помощью ряда Тейлора:

$$s(t) = k_1(A_1 \cos(\omega_1 t) + A_2 \cos(\omega_2 t)) + k_2(A_1 \cos(\omega_1 t) + A_2 \cos(\omega_2 t))^2, \quad (7)$$

где: k_1, k_2 — коэффициенты, характеризующие первую и вторую производную выходного напряжения по входному в рабочей точке транзистора. Данные коэффициенты могут быть определены экспериментальным путём, либо вычислены аналитически с помощью ВАХ транзистора. По смыслу, после смешения мы получаем линейное слагаемое и квадрат суммы модулируемого и модулирующего сигнала. Раскроем результирующий сигнал выхода смесителя подробнее:

$$s(t) = k_1 A_1 \cos(\omega_1 t) + k_1 A_2 \cos(\omega_2 t) + k_2 A_1^2 \cos^2(\omega_1 t) + 2k_2 A_1 A_2 \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) + k_2 A_2^2 \cos^2(\omega_2 t). \quad (8)$$

После применения фильтров в сигнале передающего устройства остаются всего два слагаемых:

$$s(t) = k_1 A_1 \cos(\omega_1 t) + 2k_2 A_1 A_2 \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t). \quad (9)$$

Если используется передатчик с подавлением несущей, то, дополнительно подавляется (но не полностью) также первое слагаемое с несущей частотой ω_1 . В итоге на выходные каскады передатчика поступает сигнал:

$$s(t) = 2k_2A_1A_2 \cos(\omega_1t) \cos(\omega_2t). \quad (10)$$

В результате мы пришли к тому, с чего начинали рассуждения. Модулирующий сигнал изменяет амплитуду модулируемого сигнала $A(t)$ в соответствии с законом:

$$s(t) = A(t) \cos(\omega_1t), \quad (11)$$

в котором:

$$A(t) = 2k_2A_1A_2 \cos(\omega_2t). \quad (12)$$

Для того, чтобы показать принцип передачи аналогового амплитудно-модулированного сигнала в пространстве, вернёмся к выходному сигналу передатчика и выполним тригонометрическое преобразование:

$$s(t) = 2k_2A_1A_2 \cos(\omega_1t) \cos(\omega_2t) = k_2A_1A_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t) + k_2A_1A_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t). \quad (13)$$

Таким образом, низкочастотный сигнал переносится на несущую частоту. На вход приёмника поступают два высокочастотных компонента — суммарный и разностный. Эти компоненты располагаются симметрично слева и справа от значения несущей частоты.

В приёмнике имеются свой автогенератор сигнала несущей частоты и свой смеситель. После выполнения операции смешения в приёмнике модулирующий сигнал переносится обратно в начало координат. В результате смешения и фильтрации высокая частота несущей ω_1 устраняется, а низкочастотный модулирующий сигнал с частотой ω_2 , использовавшийся в передатчике, восстанавливается в приёмнике с точностью до некоторого коэффициента пропорциональности. На практике вместо единственной модулирующей гармоники с частотой ω_2 используется несколько гармоник. Таким образом, по радиоканалу передаются звуковые и видео сигналы.

Задачей метода комплексной огибающей здесь является выделение низкочастотного сигнала и определение среднего значения его амплитуды на некотором временном интервале. Если шумомер обладает встроенным детектором огибающей, то, он позволяет вычислять

отношение сигнал-шум на входе приёмного устройства. Если детектор огибающей в шумомере отсутствует, то уровень полезного сигнала должен вычисляться в тракте приёмного устройства после прохождения входным сигналом частотного смесителя.

Принцип цифровой модуляции

При переходе к цифровой модуляции общий принцип модуляции сохраняется — один из параметров модулируемого сигнала изменяется модулирующим сигналом по заданному закону. Различие состоит в типе функций, которыми описываются изменения модулируемого параметра. При цифровой модуляции, в отличие от аналоговой, для задания законов изменения модулируемого параметра вместо гладких непрерывных функций используются ступенчатые функции с резкими переходами. В результате, отличительной особенностью сигналов с цифровой модуляцией является наличие в них разрывов первого рода, которым на графиках соответствуют резкие скачки по амплитуде, частоте или фазе.

К примеру, для того, чтобы передавать бинарные послылки с помощью сигнала с амплитудной цифровой модуляцией (рисунок 1), необходимо иметь всего 2 уровня амплитуды $A(t)$, соответствующие логическим 0 и 1. Аналогично, в случае частотной цифровой модуляции необходимо иметь два переключаемых значения частоты, а в случае фазовой цифровой модуляции — два переключаемых значения фазы.

Для радиоканала с цифровой модуляцией сигнала качество связи намного более критично, нежели чем для радиоканала с аналоговой модуляцией. В аналоговой системе низкое значение отношения сигнал-шум приводит к небольшому искажению полезного сигнала, но не влечёт «катастрофических» последствий. В цифровой же системе степень «вреда» низкого качества связи зависит от того, какие именно биты цифровой послылки «повреждены». Результатом может быть как небольшое искажение данных, так и полная потеря файла.

В этой связи особый интерес представляет выявление особенностей определения отношения сигнал-шум

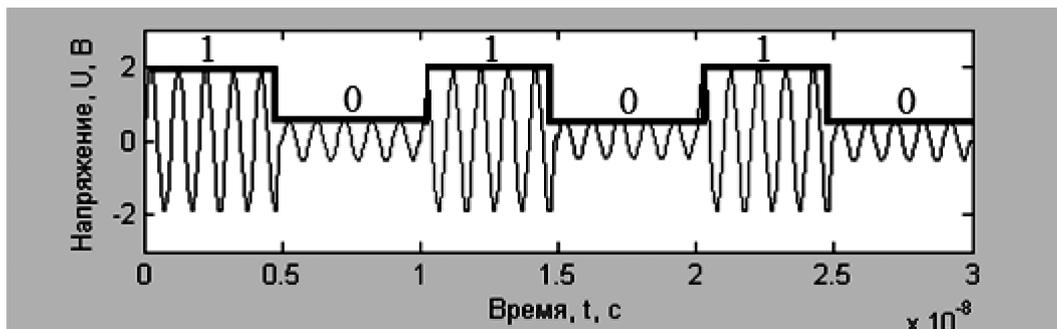


Рис. 1. Пояснение принципа цифровой модуляции на примере сигнала с амплитудной цифровой модуляцией

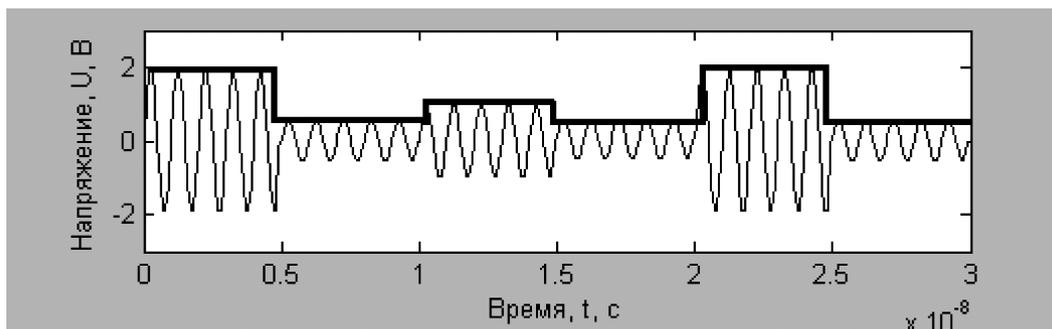


Рис. 2. Сигнал с амплитудной цифровой модуляцией

в системах радиосвязи с цифровой модуляцией сигнала по методу комплексной огибающей. Проанализируем специфику и особенности применения метода комплексной огибающей по отношению к сигналам с амплитудной, частотной и фазовой цифровой модуляцией сигнала.

Амплитудная цифровая модуляция

При амплитудной цифровой модуляции (ASK) информация передаётся за счёт дискретного изменения амплитуды $A(t)$ модулируемого сигнала (рисунок 2). Имеется конечный алфавит (ансамбль) амплитуд. Каждому символу алфавита соответствует свой уникальный уровень амплитуды. При переходе от одного символа к другому амплитуда меняется скачкообразно. Огибающая амплитуды — ступенчатая функция.

Основными элементами амплитудного модулятора являются генератор и аналоговый перемножитель (рисунок 3). Генератор вырабатывает опорное высокочастотное колебание. Модулирующий сигнал подаётся от управляющего устройства. Роль перемножителя заключается в получении компонента с произведением сигналов, аналогично тому, как это делалось в смесителе для сигнала с аналоговой модуляцией. На схеме использованы следующие обозначения: Γ — генератор; $У$ — усилитель; $УУ$ — управляющее устройство; $УВЧ$ — усилитель высокой частоты; $u_1 \dots u_4$ — сигналы.

Выражение для нахождения модуля комплексной огибающей сигнала с амплитудной цифровой модуляцией выглядит следующим образом:

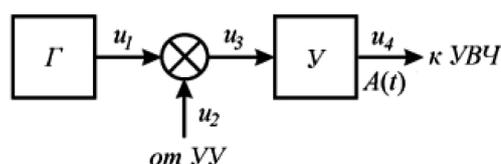


Рис. 3. Структурная схема амплитудного цифрового модулятора

$$|Z(t)| = \sqrt{A^2(t)\cos^2(\varphi) + A^2(t)\sin^2(\varphi)} = A(t). \quad (14)$$

Поскольку график амплитуды $A(t)$ представляется ступенчатой функцией, то отношение сигнал-шум в данном случае целесообразно измерять при минимальном ненулевом значении амплитуды.

Частотная цифровая модуляция

При частотной цифровой модуляции (FSK) информация передаётся за счёт дискретного сгущения и разрежения гармоник модулируемого сигнала вследствие изменения его частоты (рисунок 4). Имеется конечный алфавит (ансамбль) частот. Каждому символу алфавита соответствует своё уникальное значение частоты. При переходе от одного символа к другому частота меняется скачкообразно. Огибающая амплитуды — прямая линия.

Для того, чтобы иметь возможность влиять на частоту модулируемого сигнала в схему автогенератора на стороне передачи обычно встраивают чувствительный элемент (рисунок 5), параметр которого управляется на-

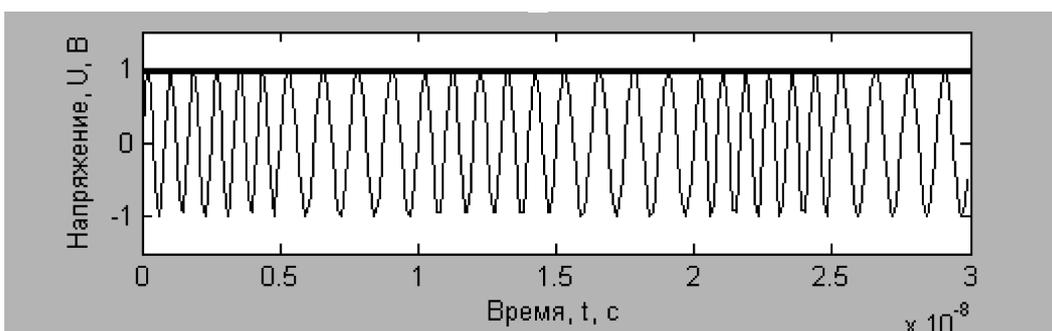


Рис. 4. Сигнал с частотной цифровой модуляцией

пряжением модулирующего сигнала. На схеме использованы следующие обозначения: УУ — управляющее устройство; ЧЭ — чувствительный элемент; Г — генератор; УВЧ — усилитель высокой частоты; u_1, u_2 — сигналы.

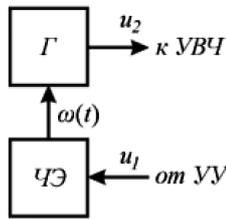


Рис. 5. Структурная схема частотного цифрового модулятора

Выражение для нахождения модуля комплексной огибающей сигнала с частотной цифровой модуляцией выглядит следующим образом:

$$|Z(t)| = \sqrt{A^2 \cos^2(\varphi) + A^2 \sin^2(\varphi)} = A. \quad (15)$$

Поскольку график амплитуды $A(t)$ представляется постоянным значением, то, в данном случае отношение сигнал-шум допустимо измерять стандартным образом, без учёта каких-либо дополнительных аспектов, то есть, так же как и при аналоговой модуляции.

Фазовая цифровая модуляция

При фазовой цифровой модуляции (PSK) информация передаётся за счёт дискретных изменений фазы модулируемого сигнала (рисунок 6). Имеется конечный алфавит (ансамбль) фаз. Каждому символу алфавита соответствует своё уникальное значение фазы. При переходе от одного символа к другому фаза меняется скачкообразно. Огибающая амплитуды — прямая линия.

Фазовый модулятор в одном из вариантов строится на основе мультиплексора гармонических сигналов со смещёнными фазами. Фазовое «разветвление» исходного гармонического сигнала, получаемого от автогенератора, осуществляется аппаратно (рисунок 7). На схеме использованы следующие обозначения: Г — генератор; ФФ — дискретный фазовый формирователь; МХ — мульт

типлексор; УУ — управляющее устройство; УВЧ — усилитель высокой частоты; $u_1 \dots u_4$ — сигналы.

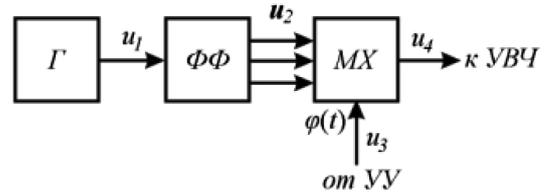


Рис. 7. Структурная схема фазового цифрового модулятора

Выражение для нахождения модуля комплексной огибающей сигнала с фазовой цифровой модуляцией выглядит следующим образом:

$$|Z(t)| = \sqrt{A^2 \cos^2(\varphi(t)) + A^2 \sin^2(\varphi(t))} = A. \quad (16)$$

Поскольку график амплитуды $A(t)$ представляется постоянным значением, то отношение сигнал-шум допустимо измерять стандартным образом, без учёта каких-либо дополнительных аспектов, аналогично предыдущему случаю с частотной модуляцией.

Заключение

В ходе проведённых исследований были проанализированы особенности определения отношения сигнал-шум в системах радиосвязи с цифровой модуляцией сигнала по методу комплексной огибающей. Рассмотрена амплитудная, частотная и фазовая цифровая модуляция. Продемонстрировано, что отличительной особенностью сигналов с цифровой модуляцией является наличие в них разрывов первого рода, которым на графиках соответствуют скачки по амплитуде, частоте, или фазе.

Показано, что в стационарных системах связи с частотной и фазовой цифровой модуляцией уровни амплитуды являются постоянными, а измерение отношения сигнал-шум не требует учёта дополнительных аспектов, что подтверждается математически. Для определения отношения сигнал-шум в системах связи с цифровой амплитудной модуляцией, в свою очередь, рекомендовано использование наименьшего ненулевого уровня амплитуды с целью обеспечения наивысшей достоверности результата.

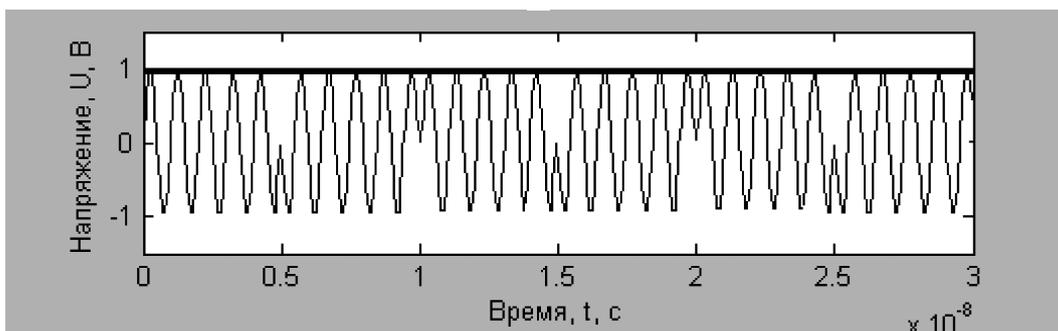


Рис. 6. Сигнал с фазовой цифровой модуляцией

ЛИТЕРАТУРА

1. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи. —издание второе, исправленное и дополненное. — М.: Техносфера, 2006. — 288 с.
2. Cardoso F.D., Lipovac V., Correia L.M. Wireless technologies for the connectivity of the future // EURASIP Journal on Wireless Communication and Networking. — 2021. — №. 118.
3. Зайцев А.В., Митрофанов Д.Г., Тимофеев И.А., Красавцев О.О., Кичулкин Д.А., Терещенко А.А., Азаров В.С., Черников А.К., Чижов А.А. Система радиосвязи со сверхширокополосными сигналами // Патент на изобретение №2580070.— 2016. — Бюл. №. 10.
4. Калистратов Д.С. О передаче видеоизображений по радиоканалу с различными типами цифровой модуляции сигнала // Актуальная наука: Международный научный журнал. — 2018.— Т. 10. — №. 15.— С. 36–39.
5. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г. Теоретические основы обработки сигналов в беспроводных системах связи: монография. — Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. — 368 с.
6. Калистратов Д.С., Минаков Е.И., Киселев А.П. Способ оценки отношения сигнал-шум на входе приёмного устройства для радиосигнала с цифровой амплитудной модуляцией // Патент России на изобретение №2695953.— 2019. — Бюл. №. 22.
7. Rojas A.J., Garcés H.O. Signal-to-Noise Ratio Based Fault Detection and Identification // Front. Control. Eng. — 2021.— Т. 3. — №. 806558.
8. Шевгунов Т.Я. Частотный анализ электрических цепей: Метод комплексных амплитуд: учебное пособие. — М.: ЛЕНАНД, 2014. — 312 с.

© Калистратов Дмитрий Сергеевич (kalistratow@list.ru); Митрофанов Дмитрий Геннадьевич (mdgvapvo@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АВТОМАТИЗАЦИЯ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИБРИДНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ И МИВАРНЫХ СЕТЕЙ

AUTOMATION OF SOLVING OPTIMIZATION PROBLEMS USING A HYBRID INTELLIGENT SYSTEM BASED ON LARGE LANGUAGE MODELS AND MIVAR NETWORKS

R. Kim
O. Varlamov
G. Afanasyev

Summary. This paper discusses the architecture of a hybrid intelligent system that combines the capabilities of large language models (LLMs) and mivar networks to automate the solution of discrete optimisation and scheduling problems. The proposed approach aims to overcome key limitations of existing language models, such as insufficient interpretability, inability to verify intermediate steps and lack of formal rigour of logical inference. The use of LLM allows us to interpret the natural-language description of the problem and automatically formalise it in the form of parameters, logical dependencies, and production rules, while the mivar model provides a rigorous and reproducible logical inference. Special attention in the paper is paid to the study of the prospects of building more autonomous intelligent systems. In particular, the possibility of automatic formation of a mivar knowledge base without the involvement of an expert at the stage of model building is considered. The paper describes in detail the architecture of the proposed system, including modules of problem analysis, rule generation, verification, logical inference, and solution formation. An experimental comparison of the performance of various large language models with the proposed hybrid architecture on a sample of typical optimisation problems is also carried out, which showed the advantage of the hybrid model in terms of accuracy and completeness of the solution.

Keywords: hybrid intelligent systems, large language models, mivar technologies, mivar networks.

Ким Радмир Ильшадович

Аспирант, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
radmir.wrld@gmail.com

Варламов Олег Олегович

Доктор технических наук, профессор,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
ovar@yandex.ru

Афанасьев Геннадий Иванович

Кандидат технических наук, доцент,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
gaipcs@bmstu.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается архитектура гибридной интеллектуальной системы, объединяющей возможности больших языковых моделей (LLM) и миварных сетей для автоматизации решения задач дискретной оптимизации и планирования. Предложенный подход направлен на преодоление ключевых ограничений существующих языковых моделей, таких как недостаточная интерпретируемость, невозможность верификации промежуточных шагов и отсутствие формальной строгости логического вывода. Использование LLM позволяет интерпретировать естественно-языковое описание задачи и автоматически формализовать её в виде параметров, логических зависимостей и продукционных правил, в то время как миварная модель обеспечивает строгий и воспроизводимый логический вывод. Особое внимание в работе уделено исследованию перспектив построения более автономных интеллектуальных систем. В частности, рассматривается возможность автоматического формирования миварной базы знаний без вовлечения эксперта на этапе построения модели. В статье детально описана архитектура предлагаемой системы, включающая модули анализа задачи, генерации правил, верификации, логического вывода и формирования решения. Также проведено экспериментальное сравнение производительности различных больших языковых моделей с предложенной гибридной архитектурой на выборке типовых оптимизационных задач, которое показало преимущество гибридной модели по показателям точности и полноты решения.

Ключевые слова: гибридные интеллектуальные системы, большие языковые модели, миварные технологии, миварные сети.

Введение

Задачи оптимизации и планирования играют ключевую роль в обеспечении эффективности процессов в промышленности, логистике, энергетике, телекоммуникациях и других отраслях. Их успешное решение позволяет рационально распределять ресурсы, минимизировать издержки и достигать целевых показателей в условиях ограничений. Стремительное развитие технологий искусственного интеллекта, особенно появление больших языковых моделей (LLM), открыло новые возможности для решения задач оптимизации и планирования. Благодаря обучению на больших текстовых данных LLM приобрели обширные знания в области математики и программирования, что позволяет им демонстрировать высокую способность к интерпретации естественного языка, решению математических задач и генерации программного кода. Также развитие методов пошагового рассуждения позволило значительно повысить устойчивость логического вывода в сложных сценариях, таких как построение алгоритмов или преобразование текстовых данных в формальные представления.

Однако, несмотря на заявленные успехи, применение LLM в области автоматизированного математического моделирования и построения формализованных решений остаётся ограниченным. Существующие архитектуры зачастую сталкиваются с трудностями при обработке длинных и сложно структурированных описаний, зависимы от точной формулировки инструкций и страдают от отсутствия верификации результатов. Модели не обладают полноценным механизмом логического вывода в строгом смысле: они не гарантируют воспроизводимости рассуждений, затруднена отладка промежуточных шагов, а интерпретируемость ограничена вероятностной природой генерации.

Эти ограничения указывают на необходимость дополнения LLM-архитектур средствами формального вывода и жёсткой логической структуры. В настоящей работе предлагается подход, сочетающий гибкость языковых моделей на этапе анализа текста с точностью и прозрачностью миварных технологий на этапе построения и решения модели [4]. Такой гибридный подход позволяет обеспечить как автоматизацию процесса формализации, так и контроль корректности результата на основе логически детерминированного вывода в рамках современной методологии разработки программного обеспечения [5], [13].

Современное состояние и ограничения LLM

В последние годы большие языковые модели значительно улучшили свои способности к многошаговому рассуждению и решению задач, требующих логического анализа. Одним из ключевых достижений стало вне-

дрение метода Chain-of-Thought (CoT) prompting, при котором модели поощряются к генерации промежуточных шагов рассуждения перед формулировкой финального ответа [19]. Данный подход позволил существенно повысить точность при решении арифметических и логических задач. Экспериментальные исследования продемонстрировали, что CoT повышает стабильность генерации, улучшает интерпретируемость промежуточных рассуждений и снижает вероятность случайных ошибок при решении задач, требующих цепочки рассуждений.

Помимо этого, современные LLM значительно расширили функциональность за счёт интеграции с внешними инструментами, включая интерпретаторы кода, базы данных и API-сервисы. Это позволило моделям выполнять более сложные задачи, такие как анализ данных, генерация исполняемого кода, взаимодействие с веб-ресурсами и интеллектуальными программными компонентами. Одним из ключевых шагов в этой области стало внедрение Model Context Protocol (MCP) — открытого стандарта, предложенного компанией Anthropic в 2024 году для стандартизации взаимодействия между языковыми моделями и внешними средами [16].

Тем не менее, несмотря на эти достижения, LLM по-прежнему сталкиваются с рядом ограничений. Во-первых, даже в относительно простых логических задачах модели могут допускать ошибки, особенно в ситуациях, требующих пространственного или временного анализа, сопоставления чисел, дат и последовательностей [20]. Во-вторых, модели демонстрируют чувствительность к порядку представления инструкций и контекста в дедуктивных задачах, что указывает на их недостаточную устойчивость к изменениям структуры входных данных [17]. Кроме того, при нарушении хронологии или неполной информации языковые модели могут ошибочно интерпретировать причинно-следственные связи, что ограничивает их способность к глубинному пониманию сложных закономерностей.

Таким образом, несмотря на значительный прогресс, LLM остаются ограниченными в аспектах интерпретируемости, формальной строгости и воспроизводимости логического вывода.

Миварные технологии логического искусственного интеллекта

Миварные технологии [4] логического искусственного интеллекта (ИИ) [9] продолжают активно развиваться и расширять области применения [2]. Например, миварные технологии используются для решения современных прикладных задач путем создания миварных экспертных систем (МЭС) [12] в целях интеллектуализации различных производств в сфере АСУ производственных

систем [10], понимания образов [18] и семантического обнаружения объектов [3]. Есть международные публикации по тематике миварных технологий, например, в области управления образовательными траекториями [14], систем принятия решений в автономных роботах [7] и автоматического создания миварных баз знаний (МБЗ) для различных приложений [11]. Результаты существующих экспериментальных работ показывают, что использование LLM, таких как ChatGPT, позволяет существенно снизить объём рутинной работы эксперта при построении миварной модели, обеспечивая автоматизированное построение правил из текстовых описаний предметной области [6].

Применение миварных технологий во многом определяется их фундаментальными архитектурными и функциональными преимуществами. Прежде всего, миварный логический вывод обладает строго детерминированной природой и полной интерпретируемостью, что обеспечивает прозрачность логики принятия решений и воспроизводимость результатов. Кроме того, благодаря механизмам параллельной активации правил, миварные системы способны эффективно масштабироваться, формируя высокопроизводительные логические ядра.

Однако, несмотря на высокую формализуемость, логическую прослеживаемость и интерпретируемость миварных систем, одним из ключевых ограничений их практического применения остаётся высокая трудоёмкость построения базы знаний. В традиционном подходе формирование миварной модели требует участия квалифицированного эксперта в предметной области, обладающего способностью транслировать неформализованные отраслевые знания в строгую систему правил, связей и параметров, что требует значительных временных и интеллектуальных ресурсов и существенно ограничивает масштабируемость и автоматизацию построения миварных баз знаний.

На рисунке 1 представлена схема решения задачи оптимизации в рамках классического экспертного подхода.

С учётом обозначенных ограничений одним из перспективных направлений современных исследований является разработка гибридных архитектур интеллектуальных систем, объединяющих концепции больших языковых моделей и миварной теории. Такая интеграция позволяет нивелировать присущие каждому из подходов ограничения, обеспечивая одновременно детерминированность и интерпретируемость логических рассуждений, а также адаптивность при обработке данных различной структуры.

В настоящей работе предлагается архитектура гибридной интеллектуальной системы, предназначенной для автоматизированного решения задач оптимизации и планирования на основе взаимодействия больших языковых моделей и миварной модели логического вывода. При разработке архитектуры системы особое внимание уделяется оценке возможности формирования базы знаний и проведения логического вывода без непосредственного участия эксперта на промежуточных этапах построения модели. Такая система реализует полностью автоматизированный процесс, охватывающий все стадии решения:

- интерпретацию текстового описания задачи;
- формализацию в виде параметров и набора логических правил;
- построение структуры миварной модели;
- выполнение логического вывода и генерацию обоснованного решения.

При этом роль эксперта сводится преимущественно к контролю качества и верификации результатов работы системы. Таким образом, предложенная архитектура может служить основой для создания интеллектуальных систем, в которых эксперт выступает в роли аудитора,

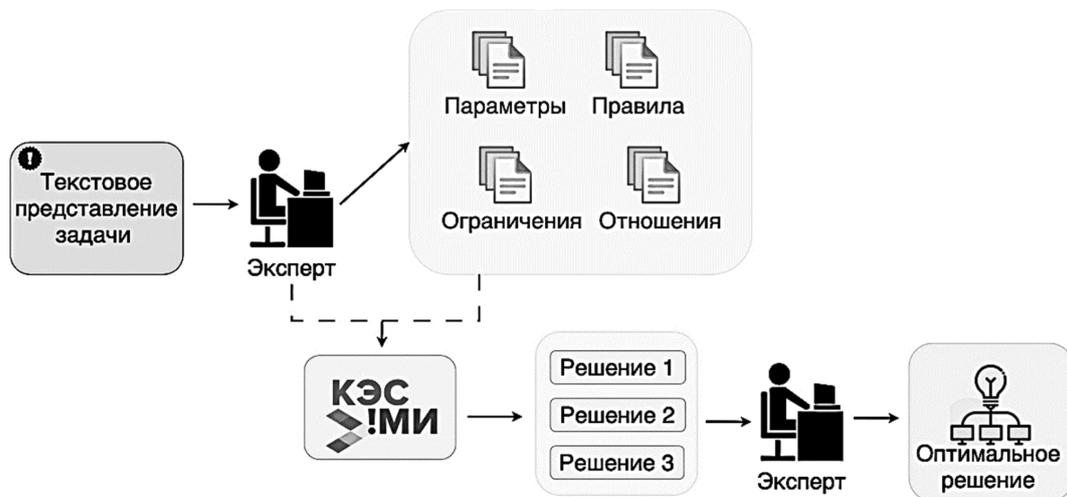


Рис. 1. Схема решения задачи оптимизации в рамках классического экспертного подхода

получая возможность при необходимости анализировать процесс построения решения, проверять корректность отдельных шагов и принимать обоснованные решения на основе множества допустимых сценариев. Это соответствует новому уровню автоматизации, при котором интеллектуальное моделирование осуществляется не силами эксперта, а фактически в автономном режиме под его наблюдением и экспертизой.

Архитектура гибридной интеллектуальной системы на основе больших языковых моделей и миварных сетей

Основная цель системы — преобразование неструктурированного текстового описания задачи в формализованную модель, адаптированную для последующего логического вывода и выбора оптимального решения. В основе лежит комбинированный подход: работа с естественным языком [1], [8], [15] реализуется средствами LLM, а логическое моделирование и вычисление — с использованием миварных сетей. Такой подход обеспечивает высокий уровень интерпретируемости, масштабируемости и воспроизводимости вычислений, сочетая формальную строгость миварного логического вывода с гибкостью обработки неструктурированных данных, присущих LLM.

Архитектура реализована в виде линейной последовательности модулей, каждый из которых выполняет специализированную функцию. Архитектура системы представлена на рисунке 2.

Анализ задачи. Данный модуль выполняет функцию преобразования неструктурированного текста на естественном языке в формализованное представление, не-

обходимое для построения миварной модели. В основе реализации лежит LLM, которой посредством вводных инструкций и контекстных подсказок были переданы основные положения миварной теории и требуемый формат вывода. В результате работы модуля создаётся единый структурированный шаблон, объединяющий все ключевые компоненты:

- Список сущностей предметной области и связи между ними
- Параметры и переменные с соответствующей семантикой и типом
- Формируются возможные отношения для текущей задачи
- Извлекаются ограничения

Создание правил. Модуль создания правил отвечает за перевод формализованной модели задачи в исполняемые конструкции, задающие логику системы принятия решений. На вход этому модулю поступает структурированный шаблон, сформированный на предыдущем шаге. В основе реализации вновь лежит большая языковая модель, которой через вводные инструкции и контекстные подсказки передаются:

- Основные принципы формирования правил согласно миварной теории
- Структура целевого представления, в нашем случае мы определили, что это будет текстовое описание + JavaScript-функции
- Правила кодирования отношений и ограничений предметной области.

Одной из ключевых особенностей предлагаемого подхода является использование двойного представления правил — в виде естественно-языкового описания и формализованного программного кода. Такая страте-

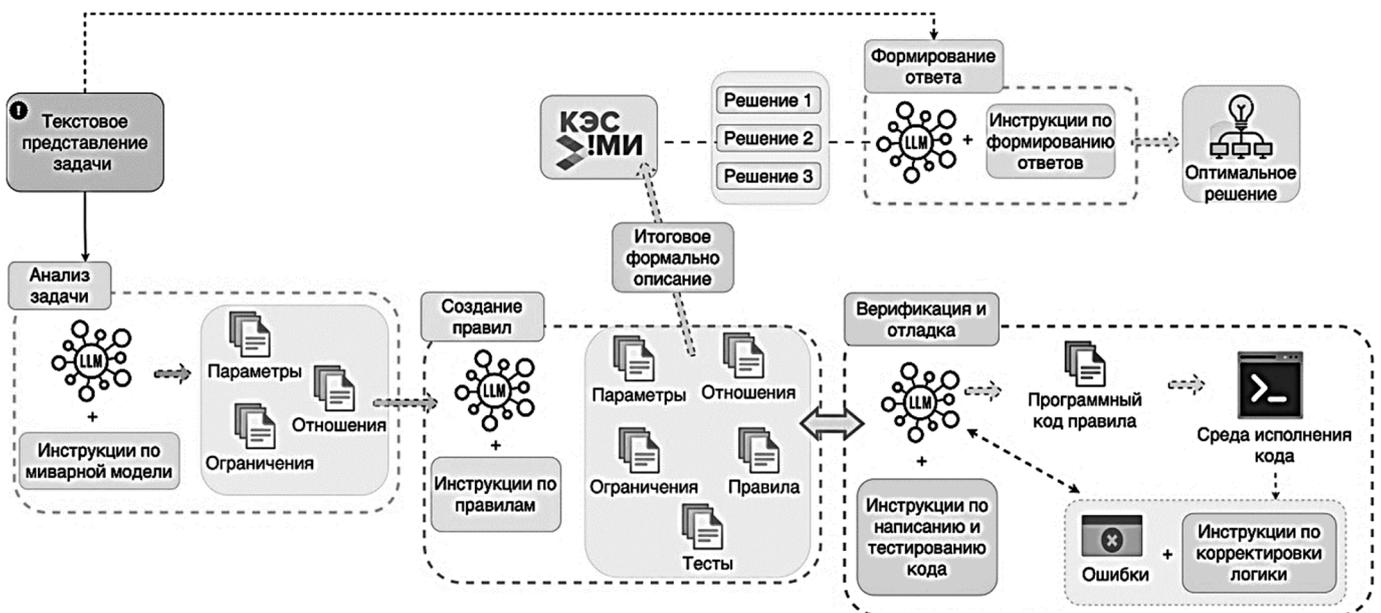


Рис. 2. Архитектура гибридной интеллектуальной системы на основе больших языковых моделей и миварных сетей

гия обусловлена необходимостью последующей автоматической верификации правил. Хотя большие языковые модели демонстрируют высокую способность к генерации логически согласованных описаний, их вывод остаётся вероятностным по своей природе и не гарантирует строгости формальных связей между условиями и следствиями. Текстовые правила, даже при грамматической корректности, могут содержать скрытые логические ошибки или неполные зависимости, что затрудняет их проверку и практическое применение в формальной системе логического вывода. Для преодоления этого ограничения каждая формулировка правила сопровождается программным кодом. Таким образом, формируется жёстко структурированная логическая единица, которая может быть протестирована и верифицирована через запуск в контролируемом окружении. Это обеспечивает дополнительный уровень защиты от генерации ошибочных или неполных правил и позволяет строить надёжную и проверяемую базу знаний для дальнейшего логического вывода.

Верификация и отладка. Модуль верификации и отладки правил играет ключевую роль в обеспечении надёжности и логической непротиворечивости правил, сгенерированных на предыдущем этапе. Основная задача данного модуля — автоматическая проверка корректности логики и синтаксиса правил, а также их соответствие ожидаемому поведению в рамках формализованной модели задачи.

Процесс верификации реализуется в виде итеративного цикла, включающего следующие этапы:

1. Генерация тестовых сценариев: на основе текстового описания и программной реализации каждого правила большая языковая модель формирует набор тестов, включающих входные данные и ожидаемые выходные результаты.
2. Исполнение в изолированной среде: сгенерированные тесты и соответствующий код правила выполняются в изолированной среде исполнения, разработанной для запуска и анализа кода.
3. Анализ результатов и коррекция: результаты выполнения сравниваются с ожидаемыми выходными данными. В случае обнаружения расхождений или ошибок, модуль инициирует процесс автоматической коррекции, в котором LLM получает информацию о несоответствиях и генерирует обновлённую версию правила.

Выполнение кода и верификация осуществляются в изолированной среде исполнения, основанной на принципах контейнеризации. Для предотвращения бесконечных итераций исправления и обеспечения устойчивости модуля в нем реализован механизм ограничения количества попыток коррекции. Для каждого правила допускается не более пяти последовательных

попыток автоматического исправления. Если после пятой итерации правило по-прежнему не соответствует требованиям, например, нарушает логическую спецификацию или не проходит тестовые сценарии, оно исключается из дальнейшей обработки. Такой подход соответствует общей концепции полной автоматизации, принятой в рамках настоящей работы, и позволяет системе сохранять автономность при масштабировании.

Все этапы верификации — от генерации тестов до исправлений и повторных запусков — сопровождаются фиксированием ключевых событий в журнале, включая входные параметры, результаты выполнения, обнаруженные ошибки и принятые меры коррекции. Это обеспечивает прозрачность логики работы системы, возможность ретроспективного анализа и последующую оптимизацию архитектуры.

Логический вывод. Модуль логического вывода в предлагаемой архитектуре реализован с использованием вычислительной среды КЭСМИ WiMi Разуматор. После прохождения всех этапов подготовки, включая проверку корректности и логической непротиворечивости правил, все данные интегрируются в КЭСМИ. В процессе интеграции формализованные правила и параметры, полученные на предыдущих этапах, преобразуются в миварную модель. Благодаря линейной вычислительной сложности и строгой детерминированности выполнения, миварная сеть при заданных условиях возвращает одно допустимое решение, соответствующее текущему набору ограничений. Однако в задачах оптимизационного характера важно не просто получить первое корректное решение, а сформировать набор альтернативных решений и выбрать наилучшее из них в соответствии с целевой функцией. Для этого в предлагаемой архитектуре реализован механизм последовательной активации миварной сети на множестве заранее подготовленных ограничений. Большая языковая модель извлекает из текста не только базовые ограничения, но и варианты их варьирования, тем самым обеспечивая полную подготовку к множественному запуску логического вывода.

На этом этапе система получает фиксированный набор входных данных, задаваемых условиями задачи, и множество вариантов ограничений, автоматически сформированных LLM. Для каждого такого варианта создаётся отдельный запуск миварной сети в КЭСМИ, в результате которого последовательно извлекаются независимые допустимые решения. Итогом работы становится множество решений, каждое из которых удовлетворяет исходным условиям задачи при различной структуре ограничений.

Формирование ответа

Завершающий модуль гибридной интеллектуальной системы отвечает за анализ множества допустимых ре-

шений, полученных на предыдущем этапе, и выбор наилучшего из них в соответствии с заданной целевой функцией. На вход модулю передаётся множество решений, сформированный в процессе многократного запуска миварной сети с различными наборами ограничений. Далее большая языковая модель на основе заранее заданных инструкций проводит оценку каждого решения на предмет соответствия критериям оптимальности в зависимости от контекста задачи. Таким образом, данный модуль замыкает полный цикл автоматизированного решения задачи — от неструктурированного текстового описания до интерпретируемого оптимального вывода, обеспечивая связность, воспроизводимость и прозрачность всех этапов обработки.

Оценка результатов и экспериментальное сравнение

Для оценки эффективности предложенной гибридной архитектуры LLM+Mivar была проведена серия вычислительных экспериментов на выборке задач дискретной оптимизации. Целью эксперимента являлась проверка того, насколько успешно модель способна автоматически интерпретировать задачу в текстовом виде, формализовать её в логических правилах и прийти к корректному оптимальному решению без участия эксперта.

Для проверки эффективности предлагаемой гибридной архитектуры LLM+Mivar была составлена тестовая выборка из 40 типовых задач оптимизационного характера, охватывающих широкий спектр прикладных сценариев: задачи распределения ресурсов, планирования, упрощённого линейного программирования, комбинаторного выбора и дискретной минимизации. Для сравнительной оценки результатов были выбраны LLM, продемонстрировавшие высокие показатели в решении различных прикладных задач. Сравнение проводилось с двумя группами моделей:

- Модели без пошагового рассуждения: GPT-4o, DeepSeek-V3, Claude-3.5, Gemini 2.0 Flash.
- Модели с рассуждением: DeepSeek-R1, Gemini Thinking.

В рамках эксперимента все модели получали идентичные текстовые описания задач на естественном языке. Для обеспечения сопоставимости результатов и объективности сравнения для всех представленных выше моделей был принят единый стандарт представления решения: требовалась генерация исполняемого кода, реализующего алгоритм вычисления результата. Такой подход позволяет обеспечить не только проверяемость корректности вывода, но и воспроизводимость рассуждений, так как каждый шаг решения фиксируется в формализованной форме. Сгенерированный код в каждом случае запускался в контролируемой среде исполнения,

где проверялась его работоспособность и соответствие возвращаемого результата эталонному решению. Полученные ответы оценивались по двум метрикам:

- Исполнимость (%) — доля задач, для которых сгенерированное моделью решение воспроизводилось без ошибок
- Точность (%): доля задач, в которых результат совпал с эталонным решением.

Сравнительная оценка моделей по метрикам исполнимости и точности при решении задач оптимизации представлена в таблице 1.

Таблица 1.

Сравнительная оценка моделей

Модель	Рассуждения	Исполнимость (%)	Точность (%)
GPT-4o	–	82.5	51.1
Claude-3.5	–	92.5	61.4
DeepSeek-V3	–	87.5	46.3
Gemini 2.0 Flash	–	90.0	55.9
DeepSeek-R1	+	92.5	73.6
Gemini Thinking	+	90.0	56.2
LLM+Mivar	+	92.5	77.3

Таким образом, полученные экспериментальные данные подтверждают, что предложенная гибридная архитектура LLM+Mivar демонстрирует высокий уровень воспроизводимости и устойчивости. В 92.5 % случаев система успешно формировала исполняемое решение, корректно реализующее алгоритм обработки задачи. Данный показатель сопоставим с результатами лучших моделей с системой рассуждений, таких как DeepSeek-R1, что указывает на надёжность формализованного логического вывода и высокую степень совместимости синтезируемых правил с механизмом исполнения логического вывода.

Особое внимание заслуживает достигнутая точность в 77.3 %, что превышает аналогичные показатели всех моделей, включённых в исследование, как с поддержкой рассуждений, так и без. Это свидетельствует о способности системы не только корректно интерпретировать формулировку задачи, но и эффективно вычислять решение.

Также важным преимуществом архитектуры LLM+Mivar является высокая интерпретируемость. В отличие от традиционных LLM, вывод которых остаётся вероятностным и зачастую непрозрачным, предлагаемая система позволяет воспроизвести и проследить весь путь рассуждений: от генерации правил и условий до финального логического вывода. Это создаёт возмож-

ности для последующего анализа, верификации и объяснения принимаемых решений, что особенно актуально в прикладных сценариях с высокой ценой ошибки.

Заключение

В данной работе была предложена и реализована архитектура гибридной интеллектуальной системы, сочетающей большие языковые модели и миварные сети для автоматизированного решения задач оптимизации и планирования. Проведённый анализ современных LLM показал их высокую способность к генерации формализованных описаний, однако также выявил фундаментальные ограничения, связанные с отсутствием логической воспроизводимости и строгой верифицируемости вывода. Миварные сети, напротив, обеспечивают строгую детерминированность и интерпретируемость, но требуют значительных усилий при ручном построении базы знаний. Разработанная гибридная архитектура

компенсирует слабости каждого из компонентов за счёт их синергии. В статье представлены результаты экспериментального сравнения производительности различных LLM и предложенной архитектуры, подтвердившие её преимущество в точности генерации корректных решений при сохранении воспроизводимости.

Таким образом, предложенная система демонстрирует перспективный путь к созданию автономных экспертных систем нового поколения, способных обрабатывать неструктурированные описания задач без необходимости привлечения квалифицированных специалистов на этапе формализации. Это открывает новые возможности для масштабируемого применения искусственного интеллекта в задачах операционного управления, планирования, логистики и других прикладных областях, требующих как гибкости, так и строгой логической обоснованности решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белянова М.А., Ревунков Г.И., Афанасьев Г.И., Гапанюк Ю.Е. Автоматическая генерация вопросов на основе текстов и графов знаний // *Динамика сложных систем* — XXI век. 2020. Т. 14. № 4. С. 55–64.
2. Варламов О.О. Большие знания: расширение областей применения миварных технологий логического ИИ // *МИВАР'23*. Сборник статей. Москва, 2023. С. 591–597. EDN: DDTLFO.
3. Варламов О.О. Подготовка исходных данных для миварных БЗ СПР роботов // *МИВАР'23*. Сборник статей. Москва, 2023. С. 545–551. EDN: FHLZBJ.
4. Варламов О.О. Эволюционные базы данных и знаний для адаптивного синтеза интеллектуальных систем. Миварное информационное пространство. М.: «Радио и связь», 2002. 286 с. EDN: RWTQOP.
5. Гурьянов Д.А., Афанасьев Г.И., Афанасьев А.Г. Методологии разработки программного обеспечения: анализ и классификация // *Перспективы науки*. 2024. № 6 (177). С. 12–26.
6. Желтова А., Ваксина И.Р., Ваксина Д.Ю., Варламов О.О. Автоматическое создание МБЗ с помощью выборки правил из текстовых инструкций с применением БЛМ chatgpt-3.5 // *МИВАР'24*: сб. науч. ст. / под ред. О. О. Варламова. — М.: ИНФРА-М, 2024. — С. 418–425.
7. Желтова А.А. Комплексный ИИ: анализ распознавания знаков на фотографиях // *МИВАР'23*. Сборник статей. Москва, 2023. С. 412–417. EDN: YUHADL.
8. Инь С., Афанасьев Г.И., Калистратов А.П. Метод применения нейронных сетей BERT-BILSTM-ATTENTION для определения эмоционального отношения автора к тексту // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики*. Серия: Естественные и технические науки. 2023. № 7–2. С. 55–58.
9. Коценко А.А., Горячкин Б.С., Базанова А.Г. и др. Модель описания миварных сетей в формате двудольных и трехдольных ориентированных графов для принятия решений и обработки информации в машиностроительном ИИ // *Динамика сложных систем* — XXI век. 2024. Т. 18, № 1. С. 5–17. EDN: XWYUYP.
10. Коценко А.А., Козырев С.А., Тодуа Д.Г. и др. Исследование применения миварных технологий для планирования маршрутов робототехнических комплексов в трехмерном логическом пространстве // *Естественные и технические науки*. 2024. № 2(189). С. 190–196. EDN: JAFWVA.
11. Максимов Н.В. Большие знания: модели и средства представления, поиска и обработки знаний в задачах интеллектуальной деятельности // *МИВАР'23*. Сборник ст. Москва, 2023. С. 579–590. EDN: HAWGBH.
12. Миварные системы принятия решений роботов. Роборазум : монография / О.О. Варламов, А.А. Коценко, Д.В. Аладин, А.А. Желтова, А.В. Марущенко. М.: ИНФРА-М, 2024. 549 с. ISBN 978-5-16-020037-8.
13. Николаева А.С., Терехов В.И., Афанасьев Г.И. Место процессной аналитики в современных исследованиях // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики*. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 1. С. 87–90.
14. Честнова Е.А., Федосеева Е.Ю., Ваганов Д.Д. и др. Разработка базы знаний МЭС по подбору лекарственных форм для антибиотиков и антимикотиков // *Естественные и технические науки*. 2023. № 5(180). С. 29–33. DOI 10.25633/ETN.2023.05.01. EDN: WOZCUJ.
15. Ян Т., Афанасьев Г.И., Калистратов А.П., Афанасьев А.Г. Сравнительный анализ рекомендательных алгоритмов для определения персональных предпочтений на основе нейронных сетей // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики*. Серия: Естественные и технические науки. 2023. № 7–2. С. 187–192.
16. Anthropic. Introducing the Model Context Protocol [Электронный ресурс] // Anthropic. 2024. URL: <https://www.anthropic.com/news/model-context-protocol> (дата обращения: 17.03.2025)
17. Quan P., Wang B., Yang K., Han L., Srivastava M. Benchmarking Spatiotemporal Reasoning in LLMs and Reasoning Models: Capabilities and Challenges [Электронный ресурс] // arXiv. 2025. № arXiv:2505.11618. URL: <https://arxiv.org/abs/2505.11618> (дата обращения: 21.04.2025).

18. Varlamov O., Aladin D. A New Generation of Rules-based Approach: Mivar-based Intelligent Planning of Robot Actions (MIPRA) and Brains for Autonomous Robots. *Mach. Intell. Res.* 2024. DOI: 10.1007/s11633-023-1473-1 EDN: TSPUOP.
 19. Wei J., Wang X., Schuurmans D., Bosma M., Ichter B., Xia F., Chi E., Le Q., Zhou D. Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models [Электронный ресурс] // arXiv. 2022. № arXiv:2201.11903. URL: <https://arxiv.org/abs/2201.11903> (дата обращения: 07.05.2025).
 20. Williams S., Huckle J. Easy Problems That LLMs Get Wrong [Электронный ресурс] // arXiv. 2024. № arXiv:2405.19616. URL: <https://arxiv.org/abs/2405.19616> (дата обращения: 17.03.2025).
-

© Ким Радмир Ильшадович (radmir.wrld@gmail.com); Варламов Олег Олегович (ovar@yandex.ru);
Афанасьев Геннадий Иванович (gaipcs@bmstu.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНЫ ЦУНАМИ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ ПАДЕНИИ ЛЬДИНЫ НА ВОДНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ, С УЧЁТОМ РЕАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ МОРСКОГО ДНА

NUMERICAL SIMULATION OF A TSUNAMI WAVE GENERATED BY AN ICE BLOCK IMPACT WITH REALISTIC SEABED TOPOGRAPHY

**E. Kolosovskiy
L. Kataeva**

Summary. This study presents a numerical simulation of tsunami wave formation caused by the impact of an ice block falling into a body of water with a non-uniform bottom profile. As a case study, a basin with a realistic bathymetric profile, characteristic of Arctic coastal zones where large ice masses may detach, is considered. The relevance of the problem is driven by the increasing frequency of such events, which can generate local tsunamis and pose a threat to coastal infrastructure. Special attention is paid to regions with a high probability of glacier front collapses. Despite their potential hazard, these phenomena remain poorly studied in the context of numerical modeling. The mathematical model is based on the one-dimensional shallow water equations under the hydrostatic approximation. The ice block is modeled as a vertically moving rectangular body that displaces water and generates a surface wave. Simulations are performed on a regular grid with a spatial step of 1 meter and a time step of 0.05 seconds. The Lax–Friedrichs scheme is used for numerical integration, providing stable computation in the presence of steep gradients. The model accounts for the physical properties of ice and water, enabling realistic reproduction of the initial wave generation phase. To evaluate the correctness of the implementation, the algorithm was tested on an idealized basin with a rectangular ice-like body. The results demonstrate a characteristic wave pattern: formation of a central surge, subsequent evolution, and gradual attenuation of the wave, confirming the physical reliability of the approach. The model can be easily adapted for various wave generation scenarios and used as a research and educational tool.

Keywords: tsunami, ice block impact, bathymetry, shallow water waves, numerical modeling, Lax–Friedrichs, free surface, one-dimensional model.

Колосовский Егор Владимирович

*Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексева
e.kolosovskiy@bk.ru*

Катаева Лилия Юрьевна

*Профессор, Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексева
kataeval2010@mail.ru*

Аннотация. В данной работе рассматривается численное моделирование формирования волны цунами, возникающей при падении льдины в водоём с переменным рельефом дна. В качестве примера исследуется акватория с реалистичным профилем глубин, характерная для арктических прибрежных зон, где возможны отколы крупных ледовых масс. Актуальность задачи обусловлена ростом частоты подобных событий, способных инициировать локальные цунами и угрожать береговой инфраструктуре. Особое внимание уделено регионам с высокой вероятностью обрушений ледникового фронта. Несмотря на потенциальную опасность, такие явления остаются слабо изученными в рамках численного моделирования. Математическая модель основана на одномерных уравнениях мелкой воды в гидростатическом приближении. Погружение льдины описывается как вертикальное движение прямоугольного тела, вызывающее вытеснение жидкости и формирование волны. Расчёты выполняются на регулярной сетке с пространственным шагом 1 метр и временным — 0.05 секунды. В качестве численного метода используется схема Лакса–Фридрихса, обладающая хорошей устойчивостью при наличии резких градиентов. Модель учитывает физические свойства льда и воды, позволяя достоверно воспроизводить начальную фазу волнообразования. Для оценки корректности реализации алгоритм протестирован на идеализированной акватории с прямоугольным льдоподобным телом. Результаты демонстрируют характерную структуру возмущения: формирование центрального всплеска, эволюцию и постепенное затухание волны, что подтверждает физическую состоятельность подхода. Модель легко адаптируется к различным сценариям и может использоваться как исследовательский и учебный инструмент.

Ключевые слова: цунами, падение льдины, батиметрия, мелководные волны, численное моделирование, Лакс–Фридрихс, свободная поверхность, одномерная модель.

Введение

С нарастанием темпов климатических изменений и масштабного таяния ледников возрастает актуальность задач, связанных с моделированием волновых процессов, возникающих при отколе крупных ледяных масс. В арктических и субарктических регионах всё чаще фиксируются эпизоды внезапных обрушений ледовых фрагментов в прибрежные акватории. Такие события способны вызывать мощные возмущения свободной поверхности, по механизму близкие к локальным цунами, и представляют потенциальную угрозу для морской инфраструктуры, навигационной безопасности и прибрежных экосистем [1, 2]. Существующие подходы к численному моделированию волн, инициируемых падением тел, ориентированы на взаимодействие с твёрдыми телами [3, 4, 5]. И не учитывают малую плотность льда и склонность к частичному всплытию или формированию колебательных движений в толще воды. В настоящей работе предложена численная модель, позволяющая воспроизвести процесс генерации волны при вертикальном погружении ледяного блока. Расчёты выполняются на регулярной пространственно-временной сетке с шагами 1 метр и 0.05 секунды соответственно. Для аппроксимации потоков выбрана схема Лакса–Фридрихса [6], обладающая хорошими стабилизирующими свойствами при наличии резких градиентов и импульсных воздействий. В отличие от схем высокой точности, она не требует дополнительных ограничений на гладкость решений, устойчива при сильных начальных возмущениях и позволяет надёжно моделировать нестационарные процессы. Начальные условия предполагают покоящуюся водную среду и ледяной блок, начинающий вертикальное движение с поверхности. Для оценки корректности численного алгоритма проведена верификация на основе экспериментальных данных, опубликованных в работе [7]. Верифицированная модель даёт глубину каверны $H_{in} = 3,0$ против 3,3 в работе [7], высота положительного гребня составила $H_{out} = 1,09$ м против 1,2 м. Таким образом, расхождение между численной моделью и эталонными экспериментальными данными не превышает $\sim 8\%$, что подтверждает физическую состоятельность и корректную реализацию алгоритма. Предложенная модель позволяет изучить влияние физических параметров льдины, геометрии дна и характера взаимодействия с жидкостью на формирование волнового фронта. В перспективе она может быть расширена до многомерных постановок с учётом вязкости, поперечных эффектов и других физических факторов, что открывает широкие возможности для дальнейших исследований.

Цель исследования — численное моделирование формирования волны, возникающей в результате вертикального погружения ледяного блока в водную среду с реальным рельефом дна [8–10].

Математическая формулировка задачи

В настоящей работе решается задача численного моделирования начальной фазы формирования волны, возникающей при вертикальном падении ледяного блока в водоём с переменным рельефом дна [10]. Для описания течения используется система одномерных уравнений мелкой воды в гидростатическом приближении [11–15]. Падение льда моделируется как вертикальное движение прямоугольного твёрдого тела с конечной скоростью [16]. В фазе погружения блок вытесняет объём воды, создавая возмущение свободной поверхности. Расчёты учитывают геометрию и плотность льда, что позволяет аппроксимировать взаимодействие с водой через источники массы и импульса [17, 18]. Введён буферный механизм: вытесненный объём аккумулируется и высвобождается в воду с заданным временным профилем, обеспечивая более реалистичную передачу энергии в волновую систему. Для численного решения применяется схема Лакса–Фридрихса [6] — устойчивая разностная схема первого порядка, надёжно работающая при наличии резких градиентов. Пространственно-временная дискретизация регулярна и удовлетворяет условию Куранта: шаг по пространству составляет 1 метр, шаг по времени — 0.05 секунды. Модель применима для мелководных акваторий с глубиной до 200 метров, при условии, что длина волны существенно превышает глубину.

Постановка задачи

В настоящем исследовании решается задача численного моделирования процесса формирования волны, возникающей в результате вертикального движения льдиноподобного тела в ограниченной водной среде [19–21]. Источником возмущения — ледяной блок с заданными геометрическими и физическими параметрами, погружающийся в воду с начальной скоростью. Батиметрия задаётся дискретным массивом глубин и проецируется на расчётную сетку [1, 2]. Движение ледяного тела задаётся в виде внешнего воздействия, направленного вертикально вниз, без учёта его внутренней деформации или взаимодействия с атмосферной средой [22, 23]. Граничные условия на концах области моделирования принимаются открытыми, что исключает отражение волны и позволяет наблюдать её свободное распространение. В ходе расчёта фиксируются: амплитуда волны, форма фронта, скорость распространения, а также влияние формы дна и характеристик тела на структуру возмущения [24].

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе численного моделирования были получены пространственные профили уровня воды и скорости течения в различные моменты времени, что позволило

проследить формирование и эволюцию волны, вызванной вертикальным погружением льдины. Ледяной блок размерами 4×3×2 м погружается в воду с начальной скоростью, соответствующей потенциальной энергии падения. Из-за значительного объема тела происходит практически полное погружение до дна, что инициирует вытеснение большого объема жидкости и образование выраженного импульсного возмущения. Максимальная амплитуда волны, зафиксированная в расчетах, достигает $\eta \sim 1,24$ м в зоне максимального подъёма, что сопоставимо с результатами экспериментальных исследований аналогичных сценариев. Волна распространяется в обе стороны от точки падения, её скорость и структура чувствительно зависят от локального рельефа дна. Влияние батиметрии проявляется на поздних стадиях, вызывая искажение формы фронта и перераспределение энергии. Ниже приведены ключевые этапы эволюции волнового процесса, отражённые на рисунке 1. Момент времени $t = 1.20$ с показывает начальную стадию гене-

рации волны и соответствует начальному погружению льдины — волновое возмущение ещё не сформировано. График скорости указывает на небольшой локальный импульс в районе погружения. При $t = 6.25$ с — фронт волны удаляется от точки воздействия и формируются первичная депрессия — отрицательное смещение свободной поверхности над зоной падения. На графике скорости наблюдаются выраженные положительная и отрицательная компоненты — зарождение двух волн, направленных в разные стороны. В момент времени $t = 9.65$ с волна продолжает распространяться, дисперсия распространяется, а за ней формируется положительный фронт волны, а из графика скорости видно, что часть жидкости уходит к берегу, другая — в противоположном направлении. Видна инерционная составляющая, указывающая на сложный характер взаимодействия. Фазу, в которой волна достигает, более удалённой области соответствует моменту времени $t = 16.75$ с. Видно, что фронт становится максимально растянутым,

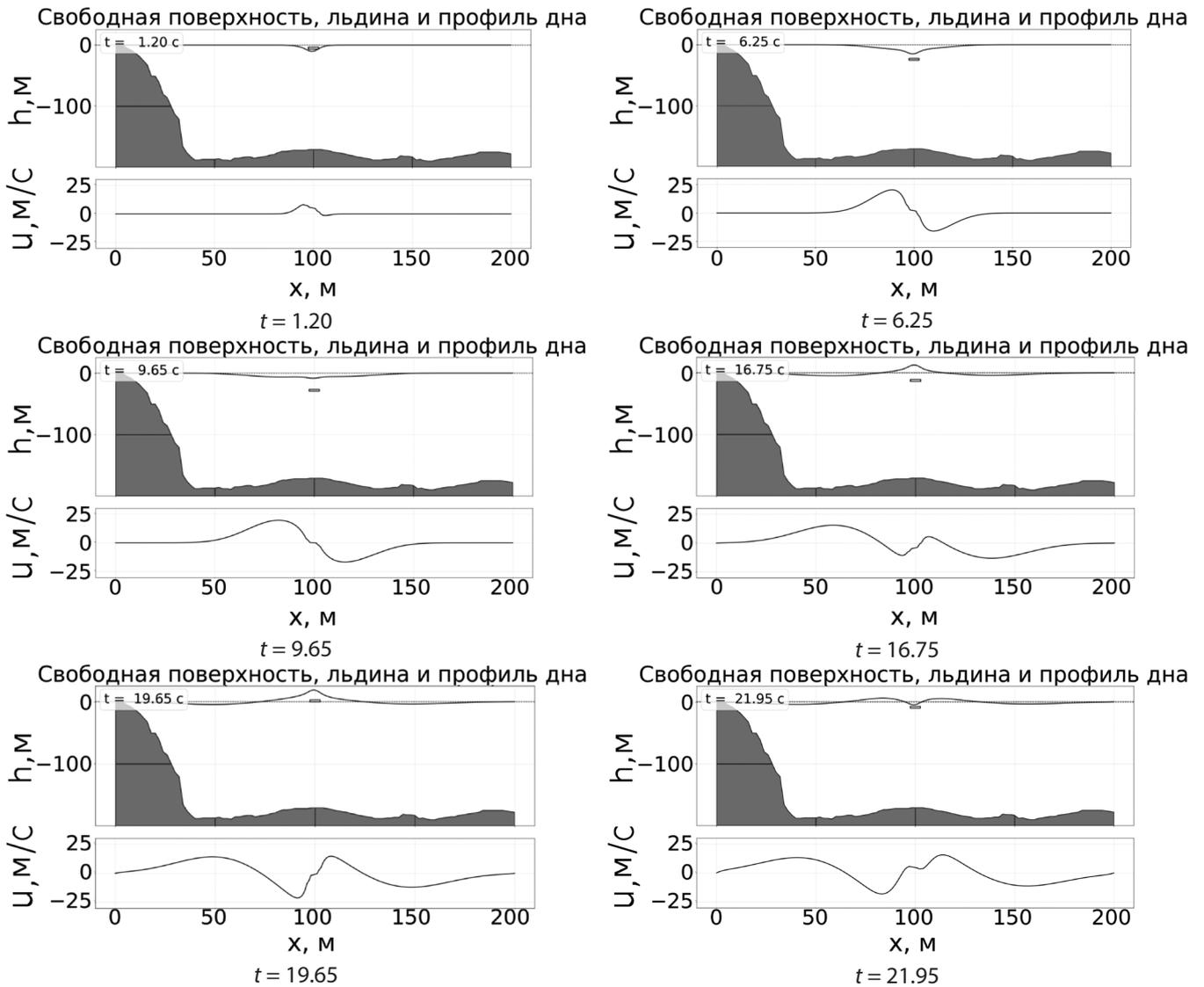


Рис. 1. Динамик формирования и деформации волны при падении льда

но сохраняет видимую структуру при этом наблюдается чётко выраженная волна положительной амплитуды (пик возвышения), а на графике скорости наблюдается характерный максимум у переднего фронта волны. Влияние батиметрии на искажение волны показано в момент времени $t = 19.65$ с. Для этого момента времени основная волна достигла пологой части дна и волновой фронт начинает искажаться под действием батиметрии: передняя часть замедляется, задняя — настигает её и появляется второй максимум скорости — отражение сложного фронта.

Момент деформации формы волна соответствует $t = 21.95$ с видно, что происходит растяжение и перераспределение энергии, высота волны снижается, а структура становится более симметричной. Скорость жидкости показывает смешанные зоны направлений — волна

частично отражается и интерферирует с собственной хвостовой частью. Таким образом, более объёмный или тяжёлый блок льда приводит к более высокой волне; сложный рельеф дна вызывает асимметрию фронта; форма волны зависит от глубины, скорости и времени погружения; взаимодействие фронта с береговой линией может вызывать вторичные волны и интерференцию. Полученные результаты подтверждают, что даже в рамках одномерной постановки возможно достоверное воспроизведение ключевых характеристик волнового процесса, вызванного падением льдины. Модель показала высокую чувствительность к начальному импульсу и конфигурации дна, что делает её подходящим инструментом для сценарного анализа в арктических условиях. Это открывает перспективы использования модели для сценарного анализа в условиях реальных арктических акваторий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврентьев И.И., Бузин И.В. Ледники российской Арктики и айсберги как потенциальная угроза морскому транспорту и добыче на шельфе // Сборник статей. — М.: Институт географии РАН; Арктический и антарктический НИИ Росгидромета, 2016. — С. 161–166. (дата обращения: 21.07.2025).
2. Кашдан А.И., Шейнкман В.С. Различия в подвижках древних ледников в Баренцевом и Карском море // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. — 2023. — № 10. — С. 116–122. (дата обращения: 21.07.2025).
3. Gallati M., Braschi G. SPH Simulation of the Wave Produced by a Block Falling into a Water Tank // Proceedings of the 12th International Conference on Fluid Flow Technologies (CMFF'03), Budapest, Hungary, September 3–6, 2003. — University of Pavia, Hydraulic and Environmental Engineering Department (HEED). URL: <https://www.unipv.it/web/guest/ateneo/struttura/dipartimenti/ingegneria-idraulica-e-ambientale> (дата обращения: 21.07.2025).
4. Mohammed F., Fritz H.M. Physical modeling of tsunamis generated by three-dimensional deformable granular landslides // J. Geophys. Res., 2012. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012JF002358> (дата обращения: 21.07.2025).
5. Tripepi G., Casella F., Aristodemo F., Filianoti P., et al. The solitary wave run-up on sloped beaches protected by submerged rigid breakwaters // Ocean Engineering. 2023. Vol. 281. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801823001234> (дата обращения: 21.07.2025).
6. Yulianti K., Marwati R., Permatasari S. A modified Lax–Friedrichs method for the numerical solution of shallow water equations // EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems. 2019. Vol. 6, No. 18. DOI: 10.4108/eai.6-12-2019.162973. URL: <https://eudl.eu/doi/10.4108/eai.6-12-2019.162973> (дата обращения: 21.07.2025).
7. Козелков А.С., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Моделирование падения тела в воду в различных условиях на основе численного решения уравнений Навье–Стокса полностью неявным методом // Акустический журнал. 2023. Т. 69, № 3. С. 341–349.
8. Гусев О.И., Хахимзянов Г.С. Численное моделирование распространения длинных поверхностных волн по вращающейся сфере в рамках полной нелинейно-дисперсионной модели // Вычислительные технологии. 2015. Т. 20, № 3. С. 3–32.
9. Шокин Ю.И., Бейзель С.А., Рычков А.Д., Чубаров Л.Б. Численное моделирование наката волн цунами на побережье с использованием метода крупных частиц // Математическое моделирование. 2015. Т. 27, № 1. С. 99–112. (дата обращения: 21.07.2025).
10. Беликов В.В., Алексюк А.И., Васильева Е.С. Численное моделирование волн прорыва: монография. — М.: Российская академия наук, 2023. — 304 с. (дата обращения: 21.07.2025).
11. Козелков А.С., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Моделирование падения тела в воду в различных условиях на основе численного решения уравнений Навье–Стокса полностью неявным методом // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева. 2015. № 3(110). С. 51–69. (дата обращения: 21.07.2025).
12. Гриневич Д.В., Бузник В.М., Нужный Г.А. Обзор применения численных методов для моделирования деформации и разрушения льда // Труды ВИАМ. 2020. № 8. С. 109–122. (дата обращения: 21.07.2025).
13. Ju J.-L., Yang N.-N., Zhang Y.-F., et al. Numerical Simulation of the Horizontal Water-Entry Process of High-Speed Vehicles // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. Vol. 12, No. 11. Article 2062. DOI: 10.3390/jmse12112062. URL: <https://www.mdpi.com/2077-1312/12/11/2062> (дата обращения: 21.07.2025).
14. Meng Z.-F., Ming F.-R., Wang P.-P., Zhang A.-M. Numerical simulation of water entry problems considering air effect using a multiphase Riemann-SPH model // Advances in Aerodynamics. 2021. Vol. 3. Article 13. DOI: 10.1186/s42774-021-00063-1. URL: <https://advancesinaerodynamics.springeropen.com/articles/10.1186/s42774-021-00063-1> (дата обращения: 21.07.2025).
15. Wang C., Wang J., Wang C., Zhang Y., et al. Numerical Study on Wave–Ice Floe Interaction in Regular Waves // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11, No. 12. Article 2235. DOI: 10.3390/jmse11122235. URL: <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/12/2235> (дата обращения: 21.07.2025).

16. Mazova R.Kh., Kurkin A.A., Giniyatullin A.R., Tyuntyayev C.M. Earthquake of 30 October 2020 in the Aegean Sea: numerical simulation of the generation and propagation of tsunami waves // *Science of Tsunami Hazards*. 2021. Vol. 40, No. 3. P. 178–195. URL: https://www.tsunamiwave.info/volume40_3/mazova.pdf (дата обращения: 21.07.2025).
17. Kolerski T. Mathematical Modeling of Ice Dynamics as a Decision Support Tool in River Engineering // *Water*. 2018. Vol. 10, No. 9. Article 1241. DOI: 10.3390/w10091241. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/9/1241> (дата обращения: 21.07.2025).
18. Vuong T.-H.-N., Wu T.-R., Wang C.-Y., Chu C.-R. Modeling the Slump-Type Landslide Tsunamis. Part II: Numerical Simulation of Tsunamis with Bingham Landslide Model // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No. 19. Article 6872. DOI: 10.3390/app10196872. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/19/6872> (дата обращения: 21.07.2025).
19. Петрухин Н.С., Катаева Л.Ю., Мазова Р.Х., Донис Н.М. Численное моделирование волны цунами от оползня // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2004. Т. 9. С. 54–62. (дата обращения: 21.07.2025).
20. Лобковский Л.И., Мазова Р.Х., Катаева Л.Ю., Баранов Б.В. Генерация и распространение катастрофических цунами в акватории Охотского моря. Возможные сценарии // *Доклады Российской академии наук*. 2006. Т. 410, № 4. С. 528–531. (дата обращения: 21.07.2025).
21. Chen F., Heller V., Briganti R. Numerical modelling of tsunamis generated by iceberg calving: validated with large-scale laboratory experiments // *Advances in Water Resources*. 2020. Vol. 142. Article 103647. DOI: 10.1016/j.advwatres.2020.103647. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030917082030121X> (дата обращения: 21.07.2025).
22. Liu Q., Hu C., Wang X. Numerical study of waves generated during iceberg calving in sliding mode // *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 262. Article 113875. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002980182200390X> (дата обращения: 21.07.2025).
23. Hu C., Wang X., Liu Q. Characteristics of iceberg calving-generated waves based on three-dimensional SPH simulations // *Coastal Engineering*. 2022. Vol. 179. Article 104854. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2022.104854. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037838392200068X> (дата обращения: 21.07.2025).
24. Forouzi Feshalami B., Løset S., Lubbad R., Lu W., Skourup H., Kashafutdinov M. A numerical model for the simulation of wave-induced erosion of floating icebergs: implementation and validation against wave flume data // *Journal of Ocean Engineering and Science*. in press 2025. DOI: 10.1016/j.joes.2025.102345. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588921125001234> (дата обращения: 21.07.2025).

© Колосовский Егор Владимирович (e.kolosovskiy@bk.ru); Катаева Лилия Юрьевна (kataeval2010@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В КОНТЕКСТЕ РАЗРАБОТКИ ВЕБ-ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ

INFORMATION SECURITY METHODS IN THE CONTEXT OF DEVELOPING A WEB PLATFORM FOR SCIENTIFIC CONFERENCES

M. Malyavin

Summary. Modern web platforms designed for scientific conferences will play an important role in the development of academic cooperation and the dissemination of scientific knowledge. However, as the functionality becomes more complex and the user audience expands, the importance of ensuring the information security of such systems increases dramatically. The issues of protecting the personal data of participants, the safety of scientific materials, resistance to external attacks and ensuring the continuous functioning of the platform are becoming particularly critical. The purpose of this article is to substantiate the need for a systematic approach to information security when developing a web application for scientific conferences, analyze current threats and vulnerabilities, and build a multi-level protection model adapted to the features of the software solution in question. In the course of the study, a structural assessment of the risks associated with the operation of the web platform carried out, potential threats classified, and vulnerable links in the system architecture identified. Based on the analysis, the concept of a multi-level information security system been developed. The practical significance of the work is to create an integrated approach to the protection of web platforms for scientific conferences, which can be scalable and adaptable for various educational and scientific institutions.

Keywords: Web application, security, information security, data protection, threat, scientific conference, web platform.

Малявин Максим Юрьевич

Аспирант, Московский

гуманитарно-технологический университет —

Московский архитектурно-строительный институт

max-malyavin@bk.ru

Аннотация. Современные веб-платформы, предназначенные для проведения научных конференций, станут играть важную роль в развитии академического взаимодействия и распространении научных знаний. Однако по мере усложнения функциональности и расширения пользовательской аудитории резко возрастает значимость обеспечения информационной безопасности таких систем. Особенно критичными становятся вопросы защиты персональных данных участников, сохранности научных материалов, устойчивости к внешним атакам и гарантии непрерывного функционирования платформы. Целью данной статьи является обоснование необходимости системного подхода к обеспечению информационной безопасности при разработке веб-приложения для проведения научных конференций, анализ актуальных угроз и уязвимостей, а также построение многоуровневой модели защиты, адаптированной под особенности рассматриваемого программного решения. В ходе исследования проведена структурная оценка рисков, связанных с эксплуатацией веб-платформы, классифицированы потенциальные угрозы, а также выделены уязвимые звенья в архитектуре системы. На основе проведённого анализа разработана концепция многоуровневой системы информационной безопасности. Практическая значимость работы заключается в создании комплексного подхода к защите веб-платформ научных конференций, который может быть масштабируемым и адаптируемым для различных образовательных и научных учреждений.

Ключевые слова: Веб-приложение, безопасность, информационная безопасность, защита данных, угроза, научная конференция, веб-платформа.

Введение

Развитие цифровых технологий значительно изменило подходы к организации научных мероприятий, включая конференции, симпозиумы и круглые столы. В условиях глобализации и удалённой коммуникации всё больше научных сообществ переходят на онлайн-формат, что обусловило необходимость создания специализированных веб-платформ, обеспечивающих полный цикл проведения конференции от регистрации участников и подачи статей до организации видеосессий и публикации итоговых сборников. Разрабатываемое веб-приложение представляет собой универсальную платформу для проведения научных конференций, объединяющую в себе ряд ключевых функций: регистра-

цию пользователей с распределением ролей (участники, рецензенты, модераторы), подачу и отслеживание научных работ, систему автоматического и экспертного рецензирования, проведение онлайн-сессий с использованием видеоконференций (на базе LiveKit), формирование сборников с присвоением DOI, мультязычный интерфейс, а также интеграцию с внешними сервисами и элементами геймификации. Основная идея платформы создать единое, удобное, безопасное и технологически современное пространство для взаимодействия исследователей, экспертов и организаторов.

На фоне активного расширения функционала и пользовательской базы особую актуальность приобретает вопрос информационной безопасности веб-

приложений. Защита данных и устойчивость платформы к киберугрозам становятся не просто технической задачей, а важным условием доверия со стороны научного сообщества. Информационная безопасность (далее — ИБ) веб-приложений сегодня находится в центре внимания специалистов, поскольку любые уязвимости могут привести к компрометации персональных данных, утечке интеллектуальной собственности, сбоям в работе системы и значительным финансовым потерям. Аналитики отмечают устойчивый рост атак на веб-сервисы: по данным отчёта В. Бесединой (Positive Technologies), количество инцидентов в третьем квартале 2024 года увеличилось на 15 % по сравнению с аналогичным периодом 2023 года [1]. Причём вредоносное ПО по-прежнему используется в 65 % атак на организации и в 72 % на частных лиц [2]. Специалисты компании BI.Zone добавляют, что четверть всех веб-уязвимостей, выявляемых ежемесячно, несут высокий уровень риска для ИБ-инфраструктуры организаций. Эти факты подтверждают необходимость системного подхода к обеспечению защиты веб-приложений, особенно тех, которые работают с конфиденциальной и научной информацией.

Целью настоящей статьи является анализ угроз и уязвимостей веб-платформ, используемых для проведения научных конференций, а также разработка многоуровневой системы информационной безопасности, которая обеспечит надёжную защиту данных, устойчивость к атакам и стабильность функционирования приложения в условиях постоянно меняющейся цифровой среды.

Результаты и обсуждение

На момент 2025 года цифровые платформы, особенно те, которые обрабатывают научные данные, персональную информацию и материалы интеллектуальной собственности, подвергаются всё более изощрённым видам атак. Актуальность системной оценки рисков для веб-приложений обусловлена как глобальной динамикой киберугроз, так и высокой стоимостью потенциальных утечек данных. Согласно М.А. Лапиной, А.Р. Багаутдиновой и Н. Загнетову (2024), более 70 % атак на веб-приложения связаны с использованием известных уязвимостей, оставленных без внимания в течение полугода и более [4].

Это говорит не только о слабых местах в архитектуре, но и о недостаточности процессов контроля и обновления безопасности. Для анализа текущей картины используется структурная модель оценки рисков, где каждое событие описывается через взаимосвязь угрозы, уязвимости и потенциального ущерба, оцениваемого по шкале вероятности воздействия. Ниже представлена таблица (табл. 1), классифицирующая типичные риски веб-приложений в 2025 году.

Таблица 1.

Шкала оценки совокупного риска (R)

Уровень риска	Диапазон значений
Очень низкий	0.00–0.20
Низкий	0.21–0.40
Средний	0.41–0.60
Высокий	0.61— 0.80
Очень высокий	0.81–1.00

В данной модели совокупный риск *R* рассчитывается как произведение вероятности возникновения события (*P*) и интенсивности возможного ущерба (*I*):

$$R = P * I,$$

где *P* — вероятность реализации угрозы, оценённая экспертно или на основе статистики инцидентов (диапазон от 0 до 1);

I — потенциальный урон (ущерб) в случае реализации угрозы, также по шкале от 0 до

R — совокупный риск, подлежащий интерпретации по уровневой шкале.

По мнению И.И. Иванова (2020), подобный подход позволяет количественно сравнивать риски и приоритизировать усилия по обеспечению безопасности системы, особенно в условиях ограниченных ресурсов [3]. Методика была адаптирована для оценки рисков, возникающих в разработке веб-платформы для проведения научных конференций, с учётом специфики её архитектуры: распределённые пользовательские роли, обработка публикаций, хранение персональных данных, онлайн-сессии в реальном времени (табл. 2). Важно отметить, что каждая из угроз в таблице оказывает влияние на как минимум два аспекта: стабильность функционирования системы и доверие со стороны участников.

При этом в табл. 3 отражены основные угрозы безопасности данных участников и материалов конференций.

Исходя из вышеизложенного следует, что угрозы безопасности данных участников и материалов конференции являются важным аспектом, требующим внимания при разработке и эксплуатации систем для проведения научных мероприятий. Основные угрозы включают несанкционированный доступ, утечку конфиденциальной информации, нарушения интеллектуальной собственности, а также атаки, направленные на отказ в обслуживании и распространение вредоносного ПО. Учитывая высокий уровень рисков, важно внедрять комплекс-

Таблица 2.

Структурная оценка рисков веб-приложений

№	Угроза	Уязвимость	Возможные последствия	Вероятность (P)	Урон (I)	Совокупный риск (R)	Уровень
1	SQL-инъекции	Отсутствие фильтрации пользовательского ввода	Захват базы данных, утечка персональных данных	0.8	0.9	0.72	Высокий
2	Межсайтовый скриптинг (XSS)	Недостаточная обработка HTML/JS	Кража сессий, подмена контента	0.6	0.7	0.42	Средний
3	Атаки на сессии (Session Hijack)	Незащищённые cookie, отсутствие HTTPS	Перехват учётных данных, вход от имени другого	0.5	0.8	0.40	Низкий
4	DDoS-атака	Отсутствие защиты на уровне сети	Потеря доступа к системе, отказ в обслуживании	0.7	0.9	0.63	Высокий
5	Утечка конфиденциальных данных	Слабое шифрование, хранение открытым текстом	Нарушение ФЗ-152, ответственность перед участниками	0.6	1.0	0.60	Средний
6	Эскалация привилегий	Ошибки в управлении правами пользователей	Доступ к административным функциям	0.4	0.7	0.28	Низкий
7	Вредоносные вложения/файлы	Отсутствие проверки загружаемых файлов	Загрузка эксплойтов, внедрение вредоносного ПО	0.6	0.8	0.48	Средний

Таблица 3.

Основные угрозы безопасности данных участников и материалов конференций

№	Угроза	Описание	Уровень риска	Воздействие
1	Несанкционированный доступ к личным данным участников	Возможность несанкционированного доступа к данным участников конференции.	Высокий	Внешнее
2	Утечка конфиденциальной информации	Перехват или утечка данных участников, таких как личные контакты или материалы статей.	Высокий	Внутреннее/Внешнее
3	Нарушение интеллектуальной собственности	Использование материалов конференции без разрешения авторов, копирование или распространение статей.	Средний	Внешнее
4	Вредоносное ПО (вирусы, трояны)	Вредоносное ПО, которое может заразить систему конференции или устройства участников, приводя к утечке данных.	Средний	Внешнее
5	Отказ в обслуживании (DDoS-атаки)	Атака на серверы системы, которая может привести к недоступности платформы конференции.	Высокий	Внешнее
6	Недостаточное управление правами доступа	Ошибки в управлении правами доступа, которые позволяют неавторизованным пользователям получить доступ к чувствительным данным.	Средний	Внутреннее
7	Недостаточная защита от фишинга	Попытки получения конфиденциальной информации участников через обманные сообщения (например, фишинг).	Средний	Внешнее

ные меры безопасности, такие как шифрование данных, строгие процедуры аутентификации и регулярный мониторинг систем. Только с учетом этих угроз можно обеспечить надежную защиту информации и снизить возможное воздействие на репутацию и доверие участников конференций.

Как видно из представленной модели, основными зонами повышенного риска остаются уязвимости, свя-

занные с работой с базами данных, некорректной обработкой пользовательского ввода, отсутствием сетевой фильтрации и слабой реализацией механизмов аутентификации. По мнению М.А. Иконникова и И.Н. Карманова (2019), именно эти участки чаще всего подвергаются атакам, особенно в условиях отсутствия регулярного тестирования на проникновение и обновлений безопасности [3]. Актуальность оценки риска заключается не в пас-

сивном учёте угроз, а в построении активной стратегии защиты, где каждое решение базируется на точном понимании вероятностей и потенциального ущерба. В следующем разделе будет предложена многоуровневая система информационной безопасности, учитывающая выявленные риски и уязвимости, а также архитектурные особенности разрабатываемой платформы.

С учётом выявленных угроз и уровня их критичности для веб-приложений, обслуживающих сферу научной деятельности, обеспечение информационной безопасности должно носить не шаблонный, а контекстно-адаптированный характер. Научные платформы обрабатывают чувствительные данные: персональные сведения участников, материалы статей до публикации, экспертные отзывы и переписку, элементы конференционного управления. Компрометация таких данных не только нарушает нормы защиты информации (например, требования Ф3-152), но и подрывает доверие научного сообщества. В этой связи оправдано применение трёхуровневой модели защиты, которая позволяет организовать системный, но при этом гибкий подход к выстраиванию ИБ-архитектуры. Каждый уровень выстраивается как логическое расширение предыдущего, включая более сложные механизмы контроля, мониторинга и реагирования. Такая модель масштабируется и адаптируется под специфику бюджета, количества пользователей и сложности функционала.

Подход базируется на принципах управления киберрисками, при котором инвестиции в защиту пропорциональны масштабам потенциального ущерба и вероятности наступления событий. По мнению В.А. Довгала и Д.И. Шередько (2022), особенно в условиях импортозамещения, построение информационной безопасности должно учитывать реальные угрозы, быть ориентированным на независимость от дорогостоящих решений и обеспечивать достаточный уровень защиты с использованием проверенных отечественных и открытых решений [8]. Модель реализуется в виде трёх ступеней:

1. Минимальный уровень — обеспечивает базовую устойчивость к самым распространённым видам атак (SQL-инъекции, XSS, перехват сессий), делает невозможной эксплуатацию уязвимостей «нулевого уровня»;
2. Базовый уровень — расширяет сферу защиты, вводя механизмы контроля внутренних операций, управления доступом, мониторинга действий пользователей и защиты хранимых данных;
3. Максимальный уровень — включает в себя элементы активной обороны, автоматизированного анализа и поведенческого моделирования, мониторинга инцидентов и реагирования на угрозы в реальном времени.

Каждый уровень может использоваться как самостоятельно, так и в совокупности с другими, в зависимости

от масштаба проекта и критичности данных (табл. 4). Подобная иерархическая структура позволяет выстраивать защиту последовательно, начиная с самых необходимых мер, и постепенно наращивать её глубину без необходимости полной перестройки архитектуры.

Таблица 4. Уровни защиты и соответствующие меры.

Уровень защиты	Описание уровня	Методы и средства
Минимальный	Базовая защита от наиболее частых угроз (SQL-инъекции, XSS, перехват сессий)	Валидация данных, HTTPS, Content Security Policy (CSP), ограничения CORS, базовая авторизация
Базовый	Расширенная защита, включающая контроль привилегий и управление доступом	Роль-ориентированный доступ (RBAC), шифрование данных в БД, защита cookie, контроль сессий
Максимальный	Комплексная модель с активным мониторингом и аналитикой поведения	Web Application Firewall (WAF), IDS/IPS, AI-сканирование, логирование и SIEM-интеграция

Далее представлены авторские рекомендации по реализации на каждом уровне:

1. Минимальный уровень. На этом этапе акцент делается на нейтрализацию самых массовых и распространённых атак:
 - внедрение строгой серверной валидации данных (например, с использованием библиотеки class-validator для Nest.js);
 - использование HTTPS с TLS 1.3 для всего трафика. Сегодня даже краткосрочная передача данных по HTTP способна стать точкой компрометации;
 - настройка CSP-заголовков (Content Security Policy) для предотвращения внедрения вредоносного JavaScript;
 - внедрение параметризованных SQL-запросов и ORM (например, Prisma или Sequelize), что исключает возможность SQL-инъекций;
 - обязательная настройка HTTPOnly и Secure-флагов для cookie, чтобы минимизировать риск кражи сессий;
 - использование двухфакторной аутентификации (2FA), например, через Google Authenticator.

Как отмечает Н.А. Шутько (2022), именно эти меры позволяют свести на нет до 60 % типовых атак на веб-приложения при сравнительно невысоких затратах на реализацию [6].

2. Базовый уровень. Здесь задача расширяется до контроля внутренних процессов и доступа между ролями:

- реализация RBAC-модели (role-based access control) с разграничением по ролям (администратор, рецензент, участник и т.д.);
- шифрование конфиденциальных данных в базе данных с использованием алгоритма AES-256;
- ведение истории сессий пользователей и автозавершение неактивных сессий;
- аудит входов и действий пользователей;
- регулярное сканирование на уязвимости с использованием инструментов, таких как ZAP или Acunetix;
- ограничение количества логинов с одного IP-адреса, антибот-защита.

По мнению А.Ж. Кинтоновой и соавт. (2020), внедрение контроля привилегий и механизмов аудита снижает риск эскалации доступа минимум на 40–45%, что критично при работе с рецензируемыми материалами и служебной информацией [7].

3. Максимальный уровень. На этом уровне защита перестаёт быть пассивной и приобретает черты постоянного мониторинга и проактивного реагирования:
 - установка WAF (например, NGINX App Protect или ModSecurity) — фильтрация запросов с возможностью автоматической блокировки атак (SQLi, XSS, CSRF);
 - интеграция с SIEM-системами (например, ELK Stack или Splunk) для централизованного сбора, анализа и корреляции событий;
 - использование AI-алгоритмов и поведенческой аналитики для отслеживания аномалий (например, резкий рост активности IP-адреса, входы ночью, неожиданные пути доступа);
 - настройка IDS/IPS-систем (Suricata, Snort) для обнаружения вторжений;
 - постоянный мониторинг журналов активности с ретроспективным анализом.

С.В. Богомолов и Д.А. Демкин (2024) подчёркивают, что использование WAF-систем и SIEM-инструментов позволяет обнаруживать до 85 % сложных атак на раннем этапе, предотвращая их развитие [5].

Реализация предложенной многоуровневой модели безопасности обеспечивает последовательное снижение совокупного риска. В табл. 5 отражено ожидаемое снижение угроз и рисков.

Показатели основаны на анализе сценариев угроз с использованием формулы риска и данных из исследований М.М. Путято, А.С. Макаряна, В.В. Лещенко, В.О. Немчиновой (2022), а также на практиках OWASP [9]. Снижение достигается за счёт: устранения критических уязвимостей (например, через CSP и фильтрацию),

Таблица 5.

Ожидаемое снижение угроз и рисков

Уровень защиты	До внедрения (средний R)	После внедрения (средний R)	Снижение риска
Минимальный	0.60	0.32	~ 47 %
Базовый	0.60	0.22	~ 63 %
Максимальный	0.60	0.12	~ 80 %

снижения вероятности успешной атаки (за счёт AI-мониторинга и поведенческого анализа), локализации последствий за счёт детальной логики разграничения доступа и сессионного контроля.

Предложенная трёхуровневая модель защиты веб-приложений позволяет гибко и последовательно выстраивать систему информационной безопасности с учётом реальных угроз, выявленных в 2025 году. Минимальный уровень обеспечивает базовую защиту от наиболее распространённых атак, включая SQL-инъекции и XSS. Базовый уровень усиливает контроль доступа и безопасность хранения данных, тогда как максимальный вводит проактивные меры, включая WAF, SIEM и поведенческую аналитику [10]. Комплексное внедрение предложенных мер способно снизить совокупный уровень риска на 47–80 %, в зависимости от глубины реализации. Подход может быть адаптирован под различные масштабы систем, обеспечивая как защиту локальных научных конференций, так и платформ федерального уровня.

Заключение

В рамках данной статьи были разработаны и предложены практические рекомендации по обеспечению информационной безопасности веб-платформы, предназначенной для проведения научных конференций. Учитывая специфику такой платформы — наличие различных ролей пользователей, обработку научных данных, публикационную активность и интеграцию с внешними сервисами особое внимание было уделено построению системной защиты, способной обеспечить надёжную и безопасную работу всех участников цифрового научного взаимодействия. Была обоснована необходимость многоуровневого подхода к информационной безопасности, который представлен в виде трёх уровней защиты: минимального, базового и максимального. Каждый из них ориентирован на конкретные классы угроз и предполагает реализацию соответствующих технических и организационных мер от базовой фильтрации и шифрования до внедрения систем активного мониторинга и WAF-технологий. Проведённая структурная оценка рисков позволила количественно измерить угрозы и определить приоритетные направления для защиты. На основе этой оценки сформированы предложенные

ния, реализация которых может снизить уровень угроз до 80 %, в зависимости от полноты внедрения. Общие выводы по статье включают:

1. Научно обоснована необходимость усиленного внимания к информационной безопасности в проектах веб-приложений научного профиля;
2. Выявлены и классифицированы основные риски, наиболее актуальные для 2025 года;
3. Разработана и предложена трёхуровневая модель защиты, охватывающая как базовые меры, так и продвинутые инструменты анализа и реагирования на инциденты;
4. Подготовлены конкретные рекомендации с указанием применимых решений (MFA, CSP, WAF, SIEM и др.), проверенных практикой;

5. Произведена оценка эффективности модели с учётом снижения рисков и повышения устойчивости приложения.

Представленная модель и предложенные меры универсальны и не ограничиваются сферой научных конференций. Они могут быть адаптированы и применены в других типах веб-приложений от образовательных платформ и медицинских информационных систем до корпоративных порталов и электронных сервисов органов власти, где критически важны надёжность, конфиденциальность и доверие пользователей. Подход, основанный на рациональном сочетании уровней защиты, позволяет выстраивать устойчивую архитектуру безопасности, сохраняющую свою эффективность даже в условиях быстро меняющейся цифровой среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безопасность веб-приложений. Электронный ресурс. Режим доступа: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Безопасность_веб-приложений (дата обращения 23.05.2025 г.).
2. Актуальные киберугрозы: III квартал 2024 года. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/aktualnye-kiberugrozy-iii-kvartal-2024-goda/#id1> (дата обращения 24.05.2025 г.).
3. Иконников М.А., Карманов И.Н. Меры и требования к защищенным веб-приложениям // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. №2. С. 13–19.
4. Лапина М.А., Багаутдинова А.Р., Загнетов Н. Исследование уязвимостей безопасности веб-приложений // Auditorium. 2024. №1 (41). С. 58–62.
5. Богомолов С.В., Демкин Д.А. Технология WAF и информационная безопасность // Вестник науки. 2024. №9 (78). С. 279–282.
6. Шутько Н.А. Теоретические понятия защиты WEB-приложений от уязвимостей // Вестник науки. 2022. №11 (56). С. 253–269.
7. Кинтонова А.Ж., Баенова Г.М., Урынбасарова А.Ж. Вопросы безопасности веб приложений // Colloquium-journal. 2020. №13 (65). С. 12–13.
8. Довгаль В.А., Шеретько Д.И. Обеспечение информационной безопасности веб-сайта в условиях импортозамещения // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2022. №2 (301). С. 67–77.
9. Путятю М.М., Макарян А.С., Лещенко В.В., Немчинова В.О. Анализ типовых уязвимостей при построении веб-приложений // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2022. №3 (306). С. 77–85.
10. Байраммырадов П., Довлетназаров Ш., Гарягдыева Г. Атаки на веб-приложения: уязвимости и способы защиты // Вестник науки. 2024. №10 (79). С. 835–838.

© Малявин Максим Юрьевич (max-malyavin@bk.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ФИЗИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫЕ НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ПОДХОДЫ В ЗАДАЧАХ ЭКОЛОГО-СТАТИСТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Новиков Кирилл Сергеевич

Аспирант,

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

kirill1novikov1@gmail.com

PHYSICALLY BASED NEURAL NETWORK APPROACHES TO THE PROBLEMS OF ECOLOGICAL-STATISTICAL FORECASTING

K. Novikov

Summary. Background and Objectives. Modern ecological forecasting tasks require models that combine accuracy, robustness to incomplete data, and compliance with fundamental physical laws. While statistical methods, particularly neural networks, offer flexibility, they often neglect physical plausibility. Conversely, physics-based models ensure interpretability and adherence to conservation laws but are computationally demanding and sensitive to uncertain inputs. The objective of this study is to develop a hybrid neural network architecture that incorporates physical constraints for eco-statistical prediction tasks. *Materials and methods.* The proposed model embeds a physical constraint based on the advection–diffusion equation into the training process of a neural network. It minimizes both prediction error and the violation of physical laws by optimizing a combined loss function that includes a physics-based regularization term. The model is trained on heterogeneous data sources, including climate variables, emission monitoring, and satellite imagery. Performance was evaluated on real-world tasks of air pollution forecasting and biodiversity classification. *Results.* The hybrid model reduced mean squared error (MSE) by 18 % compared to an LSTM network and by 9 % relative to the CALPUFF physical model. In biodiversity classification, the model improved accuracy by 14 %. It also maintained physical consistency and stable performance in the presence of up to 30 % missing input data, demonstrating enhanced interpretability and resilience. *Conclusions.* The developed approach effectively integrates the strengths of physics-based and data-driven models. It is particularly suitable for applied ecological modeling tasks that require reliable, interpretable forecasts, including air quality monitoring, climate impact modeling, and sustainable resource management.

Keywords: physics-informed learning, hybrid models, ecological forecasting, neural networks, sustainable development.

Аннотация. Актуальность и цели. Современные задачи экологического моделирования требуют моделей, одновременно обладающих высокой точностью, устойчивостью к неполноте данных и соответствием фундаментальным законам природы. Статистические методы, в частности нейросетевые модели, обеспечивают гибкость, но часто игнорируют физическую обоснованность. Напротив, физические модели строго следуют уравнениям процессов, но требуют полной информации и значительных вычислительных ресурсов. Целью данной работы является разработка гибридной нейронной сети, способной учитывать физические ограничения при решении задач эколого-статистического прогнозирования. *Материалы и методы.* В архитектуру нейронной сети интегрировано физическое ограничение на основе уравнения переноса загрязняющих веществ. Модель обучается на климатических, эмиссионных и спутниковых данных, минимизируя как ошибку предсказания, так и отклонение от физического уравнения. В качестве целевой функции используется комбинация эмпирической ошибки и физического регуляризатора. Проведена экспериментальная оценка на задачах прогнозирования загрязнения воздуха и классификации биоразнообразия. *Результаты.* Гибридная модель показала снижение MSE на 18 % по сравнению с LSTM и на 9 % по сравнению с моделью CALPUFF. В задаче классификации экосистем точность увеличилась на 14 %. Установлено, что модель сохраняет физическую непротиворечивость даже при наличии до 30 % пропущенных данных, демонстрируя устойчивость и интерпретируемость. *Выводы.* Разработанный подход объединяет сильные стороны физических и статистических моделей. Он может быть использован в прикладных экологических задачах, требующих высокой надёжности прогноза, включая мониторинг качества воздуха, моделирование изменений климата и устойчивое управление природными ресурсами.

Ключевые слова: физически обоснованное обучение, гибридные модели, экологическое прогнозирование, нейронные сети, устойчивое развитие.

Введение

Современные экологические задачи становятся всё более комплексными: от прогноза распространения загрязняющих веществ до оценки потерь биоразнообразия. Их решение требует сочетания точности, интерпретируемости и устойчивости моделей к неполноте данных. Однако существующие подходы редко удовлетворяют всем трём критериям одновременно [3].

Физически ориентированные модели, например, основанные на уравнении переноса обеспечивают высокую интерпретируемость и точность. Однако они чувствительны к ошибкам в граничных условиях и параметрах, а также требуют значительных вычислительных ресурсов. Парадоксально, но чисто статистические подходы, такие как нейросетевые модели, зачастую работают лучше в условиях ограниченной информации. Тем не менее, они склонны извлекать закономерности,

не всегда совместимые с физической природой процессов. Например, модель может предсказать рост концентрации загрязнителя там, где по законам физики должно происходить её рассеивание.

Актуальность исследования определяется необходимостью создания моделей, которые одновременно удовлетворяют требованиям точности, устойчивости и интерпретируемости. Данный аспект критически важен для задач экологического прогнозирования, где от качества моделей зависят управленческие решения и нормативное регулирование [4].

Целью данной работы является разработка архитектуры нейронной сети, учитывающей физические ограничения при обучении, и оценка её эффективности на реальных экологических данных.

Материалы и методы

Разработанная архитектура модели основана на принципах физически обоснованного обучения и включает в себя как аппроксимацию эмпирических закономерностей, так и соблюдение фундаментальных физических уравнений. Такой подход позволяет повысить интерпретируемость и устойчивость модели в условиях ограниченной или зашумлённой информации [2, с. 336; 6, с. 224].

Архитектура модели

Модель реализована в виде нейронной сети с несколькими входными каналами, включающими климатические и ландшафтные параметры, а также данные дистанционного зондирования [7, с. 1104]. В процессе обучения одновременно минимизируются два типа потерь — статистическая и физическая:

$$\mathcal{L}_{total} = \mathcal{L}_{data} + \lambda \mathcal{L}_{physics} \quad (1)$$

где \mathcal{L}_{data} — ошибка на обучающей выборке, $\mathcal{L}_{physics}$ — мера несоблюдения физического закона, λ — весовой коэффициент, определяющий степень физического контроля.

Физическое ограничение

В качестве физического ограничения используется уравнение переноса, описывающее поведение загрязняющих веществ в подвижной среде:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla C = D \nabla^2 C + S, \quad (2)$$

где C — концентрация вещества, \vec{v} — вектор скорости потока, D — коэффициент диффузии, S — функция источников и стоков вещества.

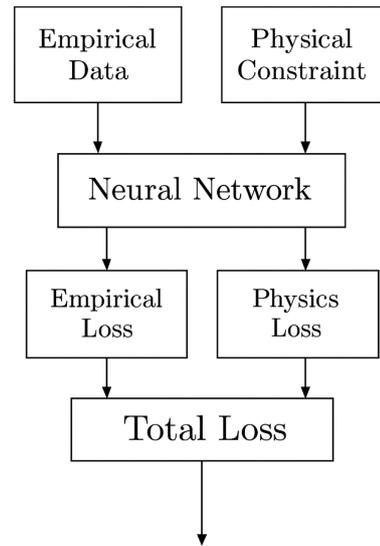


Рис. 1. Структура гибридной модели, объединяющей эмпирические данные и физическое ограничение

В процессе обучения это уравнение аппроксимируется через регуляризатор:

$$\mathcal{L}_{physics} = \left| \frac{\partial \hat{C}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \hat{C} - D \nabla^2 \hat{C} - S \right|^2, \quad (3)$$

где \hat{C} — предсказанное моделью значение концентрации, а остальные переменные соответствуют параметрам физической модели.

Источники данных и процесс обучения

Для обучения модели использовались экологические и метеорологические данные из различных источников, приведённых в таблице 1.

Таблица 1.

Описание источников данных, использованных в исследовании

Источник данных	Тип данных	Пространственное разрешение	Временное разрешение	Формат данных
Пункты мониторинга загрязнений	NO ₂ , CO, PM _{2.5} , O ₃	5 км	1 час	CSV
Спутники Sentinel-5P	Концентрации NO ₂ , CO	~7×3.5 км	1 сутки	NetCDF
ERA5 (ECMWF)	Температура, ветер, давление	30 км	1 час	GRIB
Региональные отчёты о фауне	Наблюдения видов	10 км	1 сезон	CSV

Данные были интерполированы на единую пространственно-временную сетку. Для стандартизации входных признаков использовалась z-нормализация:

$$x_{norm} = \frac{x - \mu}{\sigma}, \quad (4)$$

где μ и σ — среднее значение и стандартное отклонение соответствующего признака по обучающей выборке.

Оптимизация параметров модели производилась с использованием стохастического градиентного спуска с адаптивным шагом (Adam) [1, с. 105]. Обновление параметров осуществлялось по стандартному правилу:

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \eta \nabla_{\theta} \mathcal{L}_{total}, \quad (5)$$

где θ_t — параметры модели на итерации t , η — шаг обучения, $\nabla_{\theta} \mathcal{L}_{total}$ — градиент функции потерь по параметрам.

Обучение проводилось в течение 300 эпох, с размером батча 64. Для предотвращения переобучения применялась L2-регуляризация и ранняя остановка по валидационной метрике.

Результаты

Для оценки эффективности предложенной архитектуры были проведены численные эксперименты на задачах прогноза атмосферного загрязнения и клас-

сификации биоразнообразия. Сравнительный анализ проводился с двумя базовыми моделями: статистической LSTM и физической моделью CALPUFF.

В качестве метрик использовались среднеквадратичная ошибка (MSE) и средняя абсолютная ошибка (MAE):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2, \quad MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|, \quad (6)$$

где \hat{y}_i — предсказанное значение, y_i — истинное значение, n — размер выборки.

На основе климатических и эмиссионных данных производился прогноз концентрации NO₂ в течение недели. На рисунке 2 представлены сравнения между фактическими измерениями и предсказаниями трёх моделей.

Как видно, гибридная модель демонстрирует высокую точность и стабильность. Количественные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Ошибки прогнозирования концентрации NO₂

Модель	MSE	MAE
LSTM	6,72	2,13
CALPUFF	5,18	1,82
Гибридная модель	4,23	1,55

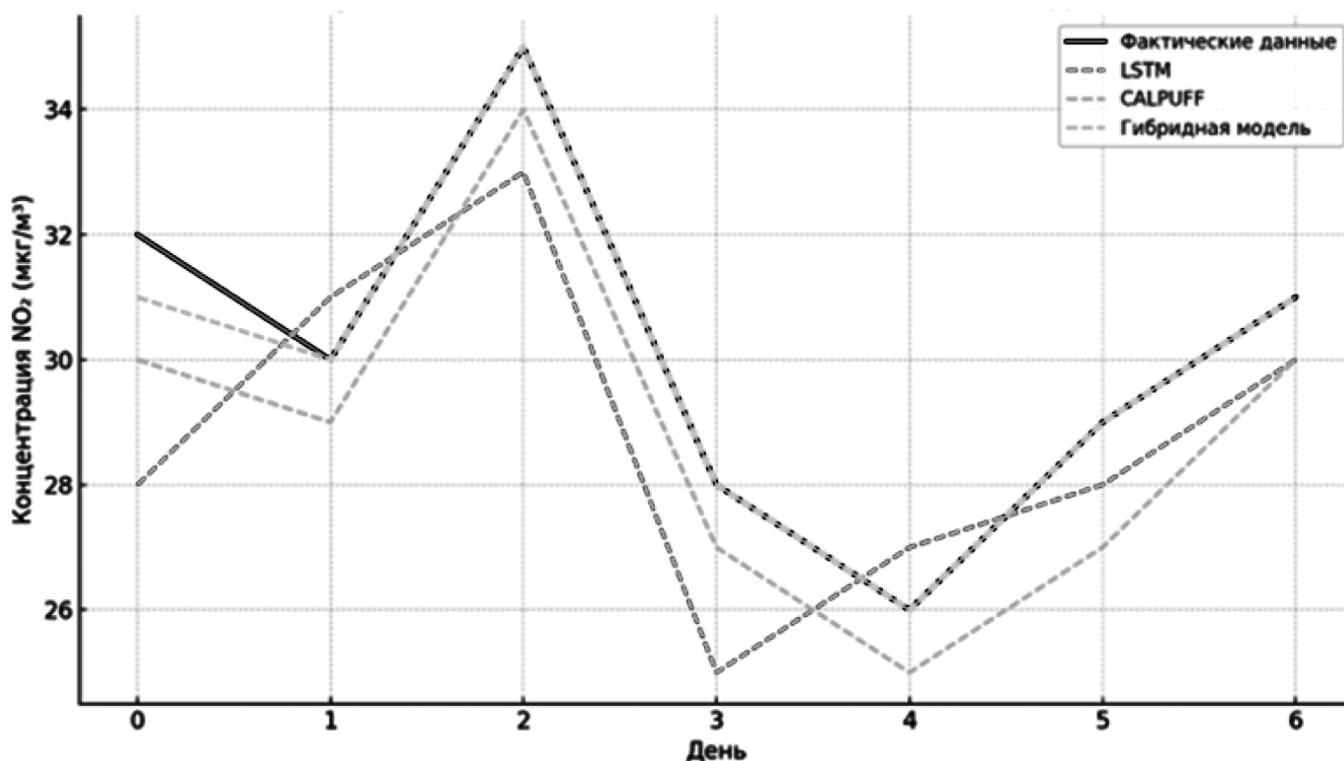


Рис. 2. Сравнение концентрации NO₂ (мкг/м³): фактические данные и предсказания моделей

Результаты показывают, что использование физического ограничения снижает ошибку на 18 % по сравнению с LSTM и на 9 % по сравнению с CALPUFF.

Во второй задаче модели обучались классифицировать тип доминирующей экосистемы по метео- и ландшафтным параметрам [4]. Дополнение модели физическим ограничением дало прирост точности классификации до 89,3 %.

Таблица 3.

Точность классификации типов биоразнообразия

Модель	Ассурасу (%)
LSTM	74.6
Без физического ограничения	78.1
Гибридная модель	89.3

Для анализа устойчивости к пропущенным данным искусственно исключались случайные значения входных признаков (до 30 %). На рисунке 3 показано изменение ошибки MSE в зависимости от доли пропусков.

Гибридная модель показала устойчивость к деградации: при 30 % пропусков рост ошибки составил всего 9 %, тогда как у LSTM — 26 %.

Оценка соблюдения физических ограничений производилась через величину остатка в уравнении переноса. На рисунке 4 представлена тепловая карта значений $\mathcal{L}_{physics}$ по области исследования.

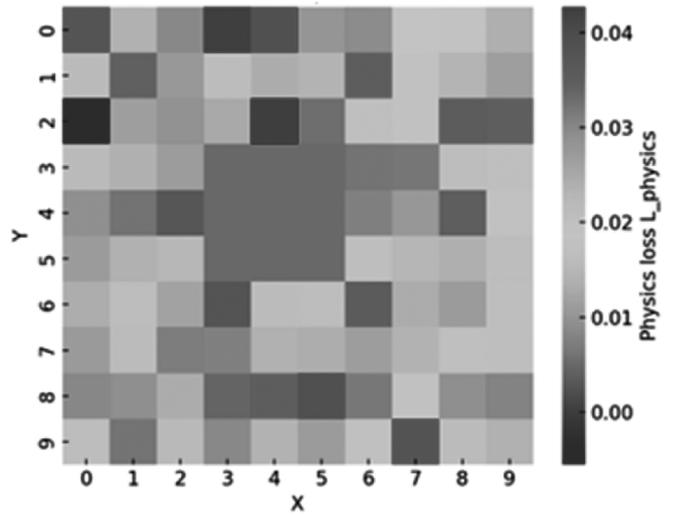


Рис. 4. Пространственное распределение физического остатка

Минимальные значения наблюдаются в районах с полной и достоверной информацией, что подтверждает, что модель в этих условиях сохраняет физическую правдоподобность.

Заключение

В представленной работе разработан гибридный метод экологического прогнозирования, сочетающий преимущества нейросетевых моделей и физически обоснованных уравнений. В основе метода лежит принцип

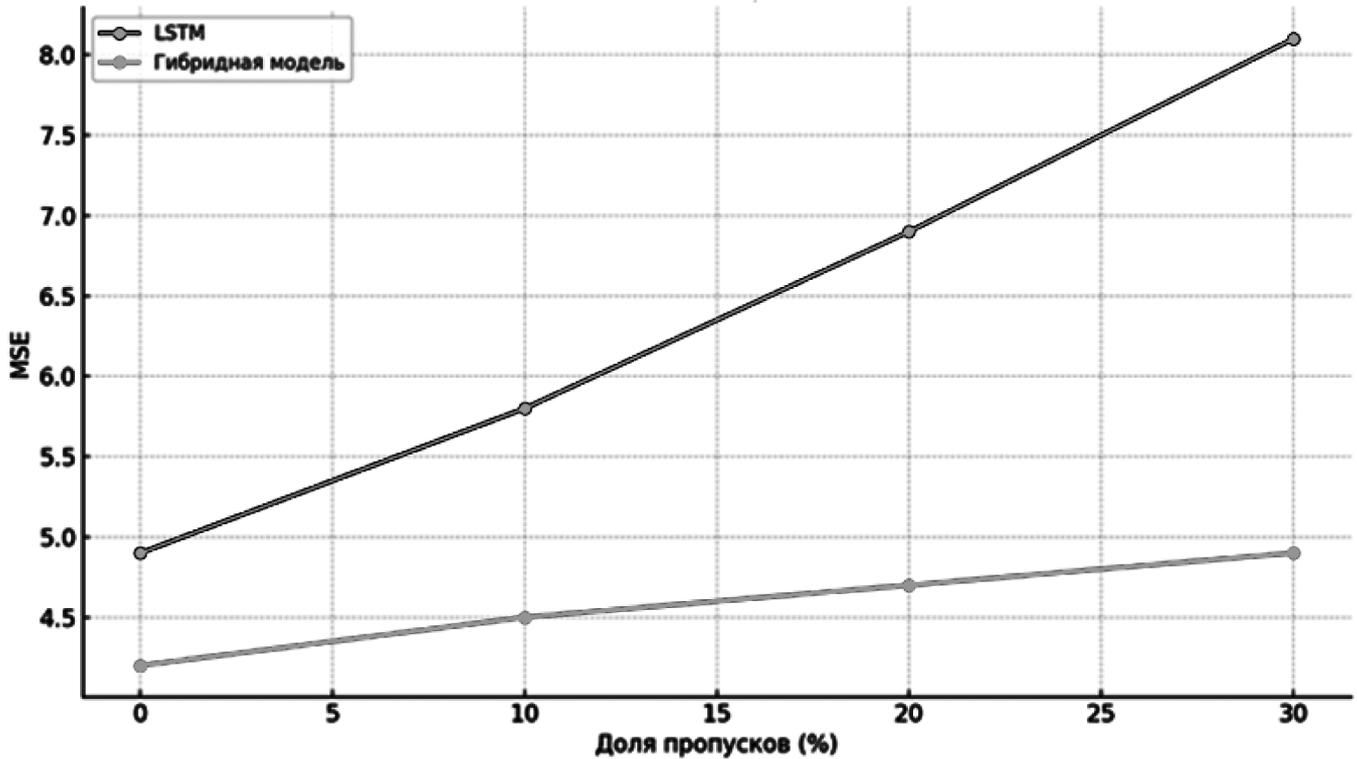


Рис. 3. Зависимость MSE от процента пропущенных значений во входных данных

физически-информированного обучения, при котором модель не только обучается на данных, но и контролируется на соответствие фундаментальным физическим законам. Такой подход позволяет одновременно решать задачи повышения точности, устойчивости и интерпретируемости прогноза — ключевые требования к современным прикладным моделям в области экологии.

Экспериментальные результаты подтвердили эффективность предложенной архитектуры: в задачах прогнозирования атмосферных загрязнений достигнуто снижение ошибок по сравнению с базовыми моделями, а при классификации типов биоразнообразия — существенное улучшение точности. В условиях пропусков и зашумлённости данных модель продемонстрировала устойчивое поведение, сохраняя физическую согласованность предсказаний.

Важной особенностью подхода является его универсальность. Метод может быть адаптирован к различным классам задач, включая мониторинг качества воздуха, оценку климатических рисков, моделирование гидрологических процессов и устойчивое управление природными ресурсами.

В дальнейшем планируется расширение функциональности модели за счёт включения более сложных физических ограничений и внедрение в архитектуру механизмов оценки неопределённости. Это позволит повысить надёжность прогнозов в задачах, критичных к ошибке — в частности, в системах раннего предупреждения и принятия решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барсегян А.А. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 336 с.
2. Гуревич И.М. Информационные характеристики физических систем / И. М. Гуревич. — М.: ИПИ РАН, 2009. — 170 с.
3. Редько В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепции эволюционной кибернетики / В.Г. Редько. — М.: Ленанд, 2019. — 224 с.
4. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. — М.: Диалектика, 2019. — 1104 с.
5. Юрков Н.К. К проблеме обеспечения безопасности сложных систем / Н.К. Юрков // Надёжность и качество: тр. Междунар. симп.: в 2 т. / под ред. Н.К. Юркова. — Пенза: Изд-во ПГУ, 2011. — Т. 1. — С. 104–106
6. Hettige K.H., Ji J., Xiang S., Long C., Cong G., & Wang J. (2024). AirPhyNet: Harnessing Physics-Guided Neural Networks for Air Quality Prediction. arXiv preprint arXiv:2402.03784. DOI: 10.48550/arXiv.2402.03784.
7. Tao Yang, JiangChuan Chen, Hongli Deng, Baolin He, A lightweight intrusion detection algorithm for IoT based on data purification and a separable convolution improved CNN, Knowledge-Based Systems, Volume 304, 2024, 112473, ISSN 0950-7051, <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2024.112473>.

© Новиков Кирилл Сергеевич (kirill1novikov1@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИХ СТРУКТУРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПО МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО

MODEL OF FUNCTIONING OF SMART POWER SUPPLY GRID FOR CONTROL OF THEIR STRUCTURAL STABILITY BY THE MONTE CARLO METHOD

V. Obedkov

Summary. The structure and functioning processes of power supply networks are characterized by a diverse range of elements and a variety of information and energy flows, as well as the need to make decisions under limited time conditions, considering various aspects of the interaction of organizational and technical complexes with the environment, generation facilities and consumers. The article presents an adaptation of the most common method for modeling such systems, based on the integrated use of Monte Carlo statistical modeling technology and graph theory. The simulation approach to the statistical analysis of the structural stability of information chains of smart power supply networks allows, for a given level of the reliability indicator, to estimate the range of change in the output characteristics of the system elements, which does not take the system under consideration out of the state of stability.

Keywords: smart grid, simulation modeling, decision tree, Bernoulli variable.

Объедков Вячеслав Владимирович

Аспирант, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Поволжский институт управления имени П.А. Столыпина, г. Саратов
Ovv862@rambler.ru

Аннотация. Структура и процессы функционирования сетей электроснабжения, характеризуются разнотипной номенклатурой элементов и разнообразием информационно-энергетических потоков, а также необходимостью принятия решений в условиях ограниченного времени с учетом различных аспектов взаимодействия организационно-технических комплексов с окружающей средой, средствами генерации и потребителями. В статье представлена адаптация наиболее распространённого метода моделирования таких систем, основанного на комплексном использовании технологии статистического моделирования Монте-Карло и теории графов. Имитационный подход к статистическому анализу структурной устойчивости информационных цепей интеллектуальных сетей электроснабжения позволяет для заданного уровня показателя достоверности оценить диапазон изменения выходных характеристик элементов системы, который не выводит рассматриваемую систему из состояния устойчивости.

Ключевые слова: интеллектуальные сети электроснабжения, имитационное моделирование, дерево решений, бернуллиева переменная.

Конечная и основополагающая цель внедрения и совершенствования технологий интеллектуальных сетей электроснабжения — обеспечить устойчивое, надежное и эффективное электроснабжение с минимальными потерями энергии [1].

Структура и сложные процессы функционирования сетей электроснабжения, характеризуются разнотипной номенклатурой элементов и разнообразием информационно-энергетических потоков, необходимостью принятия решений в условиях ограниченного времени с учетом различных аспектов взаимодействия организационно-технических комплексов с окружающей средой [2, 3].

Наиболее распространённые методы моделирования таких структурно распределенных систем (рис. 1) основаны на комплексном использовании методов статистического моделирования Монте-Карло и деревьев решений.

В частности, на основе графа функциональных взаимосвязей между характеристиками элементов сети электроснабжения можно строить большие статистические схемы имитационного моделирования процессов управления и контроля, сколь угодно большой размерности.

Как правило, возникает необходимость определения функциональных зависимостей между регулируемыми характеристиками (параметрами процессов) и целевыми характеристиками, описывающими существенные свойства системы и изменяющимися опосредованно при изменении параметров.

Общая модель функциональной зависимости между характеристиками сети электроснабжения представляется в виде [4]:

$$Y = \varphi(X, Z), \quad (1)$$

где X — есть вектор регулируемых характеристик, Y — вектор целевых характеристик, а Z — случайный вектор.

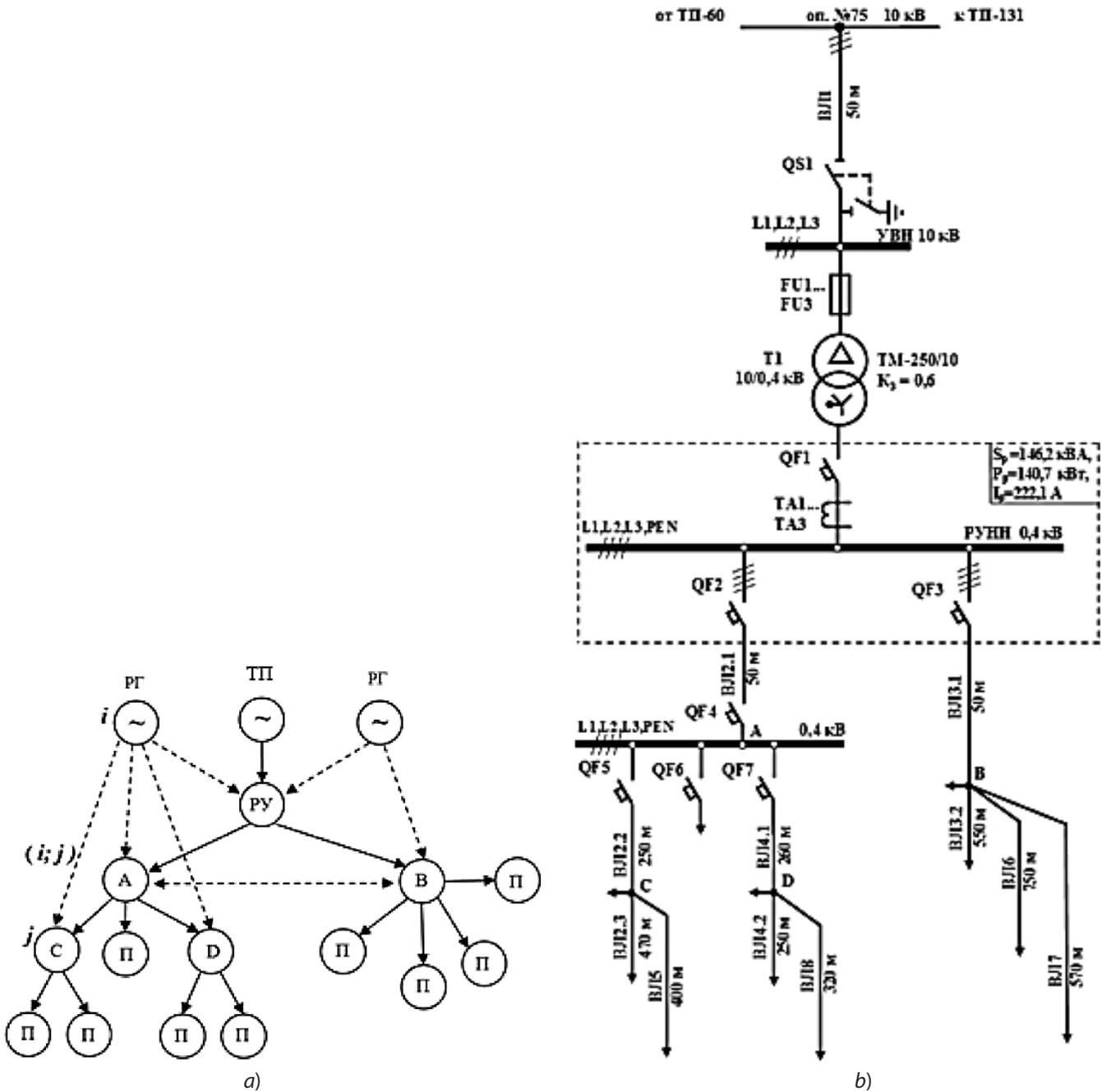


Рис. 1. Варианты построения графа (а) децентрализованной системы электроснабжения (b): i, j — узлы графа; $(i; j)$ — ветвь графа между i -й и j -й вершинами, включающего распределительные устройства (PY), распределительные пункты (A–D), источники (PG, TP) и потребители электроэнергии (П)

При определении вероятностных параметров регулируемых характеристик необходимо осуществить выбор среди вероятностных распределений (рис. 2). Данные, управления различными этапами в сфере контроля электросетей, образуют выборку [5]:

$$H = (X_i, Y_i), i = 1, \dots, n. \quad (2)$$

Удачная аналитическая модель на ее основе считается более ценной, чем имитационная, т.к. обладает важ-

ным свойством воспроизводимости на классе объектов (прототипов).

Однако, применительно к сложным и распределенным системам аналитическое упрощение во избежание громоздкости влечет снижение адекватности описания реальных явлений и процессов [6]. В отличие от аналитического, имитационное моделирование формирует новые знания относительно поведения той или иной архитектуры моделируемого оригинала в процессе, как

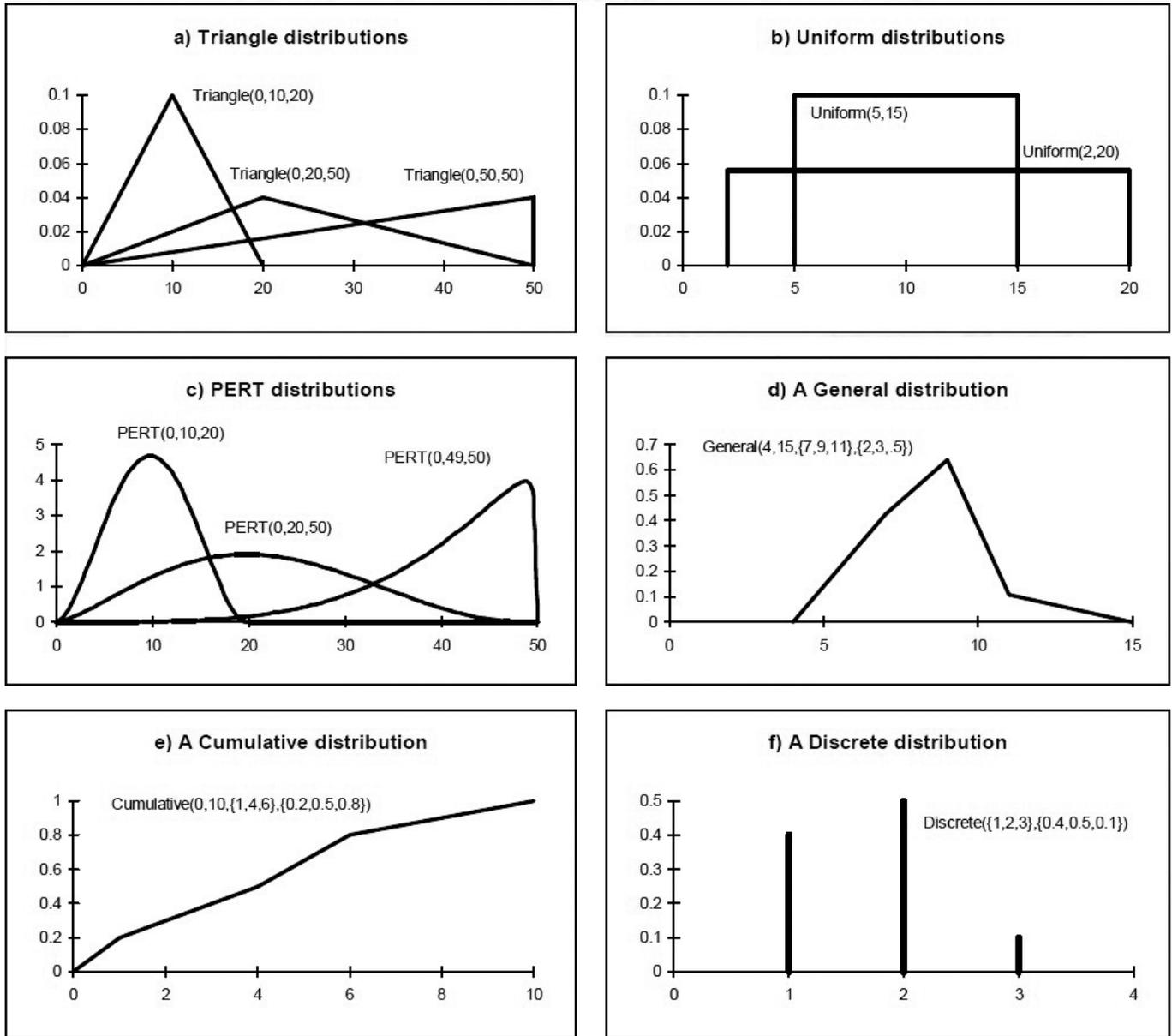


Рис. 2. Примеры распределений случайных величин, используемых в имитационном моделировании процессов в сетях электроснабжения

правило, множественной имитации его определенных аспектов.

В этом случае в схеме имитационного моделирования присутствует как модель имитации, так и модель ее применения и многократного запуска (рис. 3). В свою очередь, наличие таких программных составляющих снижает фундаментальную ценность имитационного моделирования, а в случае распределённых больших систем снижает и ценность по показателю «вычислительные затраты — стоимость» разработки модели и ее применения.

Число комбинаций малого числа архитектурных или процедурных параметров таких систем влечет экспоненциальный взрыв в количестве вариантов запусков модели на имитацию.

Выход из сложившегося противоречия находят в симбиозе аналитической и имитационной моделей, где первая является математическим базисом начального этапа моделирования (рис. 4).

Тем самым частично снимается проблема фундаментальной ценности и воспроизводимости, но не размерности и экспоненциального взрыва. Роль имитационного статистического моделирования в организации математического эксперимента по исследованию эффективности транспортных систем иллюстрирована на рис. 5.

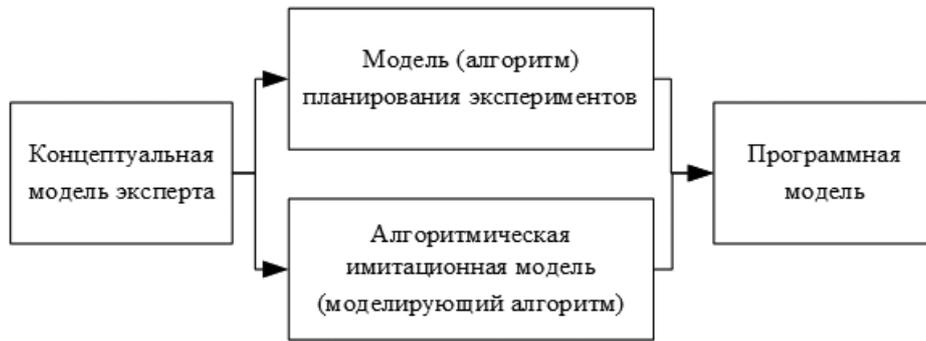


Рис. 3. Схема имитационного моделирования



Рис. 4. Схема аналитико-имитационного моделирования

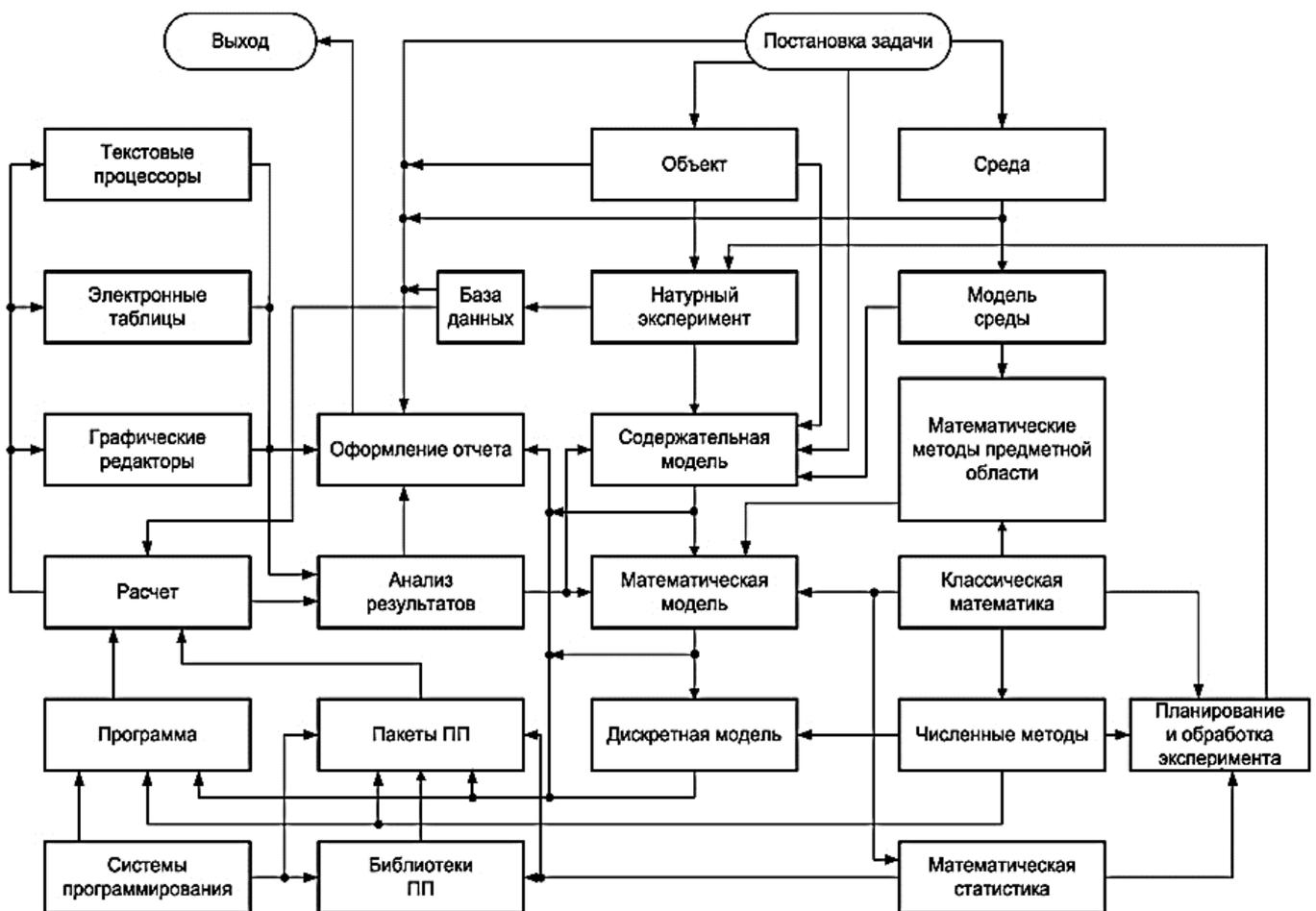


Рис. 5. Общая схема этапов и компонент моделирования в распределенных, сложных эмерджентных системах электроэнергетики

Имитационное моделирование — это методология исследования сложных систем для понимания их функционирования и для принятия обоснованных решений на задействование средств управления и адаптации. Имитационное моделирование безальтернативно для:

- реализации потенциальных возможностей повышения эффективности решения задач контроля, управления, поиска и оптимизации за счет использования новых данных;
- обоснования создания специализированных интегрированных систем поддержки принятия управленческих решений.

Представим задачу оценивания показателя какого-то конечного показателя P_g , например вероятности безаварийной работы источника генерации, нагруженного в сети произвольной топологии трансформаторных подстанций и промышленных и бытовых потребителей в течение заданного промежутка времени.

Принципы построения данной статистической модели поясним с использованием примера построение структуры элементов сети электроснабжения, граф которой изображен на рис. 6.

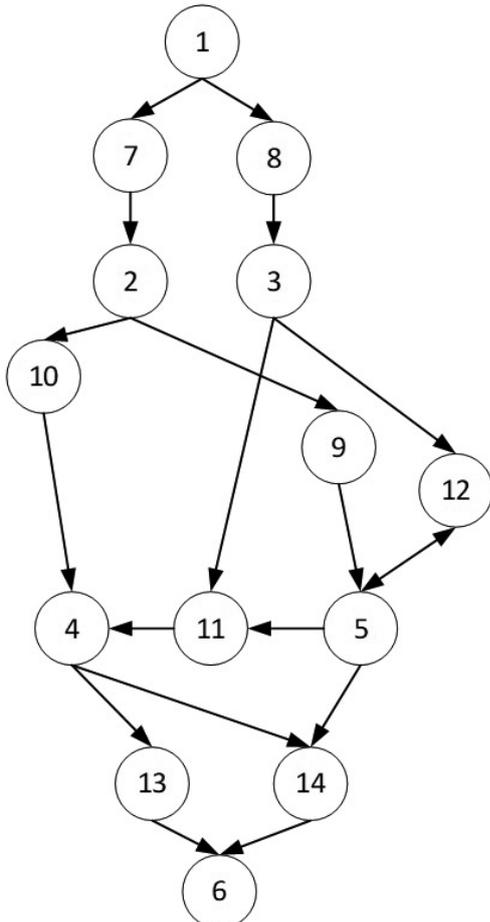


Рис. 6. Пример фрагмента графового представления процессов функционирования фрагмента структуры элементов сети электроснабжения

Каждому структурному элементу данной структуры, помеченному на рис. 6 номером ($j = \overline{1,14}$) поставим в соответствие бернуллиеву переменную [7]:

$$I_j = \begin{cases} 1, \\ 0. \end{cases} \tag{3}$$

где «1» означает, что j -й элемент, имитирующий целевую функцию элемента реальной сети электроснабжения — выполнен, совершен; 0 — в противном случае.

Вероятность события $\bar{A}_j = \{I_j = 0\}$ считается заданной и равна P_j .

Буквами a, b, c, d, e — обозначим возможные пути реализации энергообеспечения потребителей от первого элемента к шестому, и для каждого из путей также введем соответствующую бернуллиеву переменную (I_f, I_g, I_c, I_d, I_e). Очевидно, можно записать

$$\begin{aligned} I_d &= I_1 \cdot I_7 \cdot I_2 \cdot I_{10} \cdot I_4 \cdot I_{13} \cdot I_6; \\ I_g &= I_1 \cdot I_7 \cdot I_2 \cdot I_9 \cdot I_5 \cdot I_{11} \cdot I_4 \cdot I_{13} \cdot I_6; \\ I_c &= I_1 \cdot I_7 \cdot I_2 \cdot I_9 \cdot I_5 \cdot I_{12} \cdot I_5 \cdot I_{14} \cdot I_6; \\ I_d &= I_1 \cdot I_8 \cdot I_3 \cdot I_{11} \cdot I_4 \cdot I_{13} \cdot I_6; \\ I_e &= I_1 \cdot I_8 \cdot I_3 \cdot I_{12} \cdot I_5 \cdot I_{14} \cdot I_6; \end{aligned} \tag{4}$$

Тогда, вероятность выполнения всего процесса функционирования фрагмента сети электроснабжения (рис. 6) в i -той реализации процесса моделирования можно характеризовать бернуллиевой переменной I_i равной

$$I_i = 1 - (1 - I_d) \cdot (1 - I_g) \cdot (1 - I_c) \cdot (1 - I_d) \cdot (1 - I_e) \tag{5}$$

Вероятность полной реализации процесса функционирования фрагмента сети электроснабжения P_g (сигнала) от начального события (вершина 1 на рис. 6) до заключительного этапа (на рис. 6 вершина 6) оценивается по зависимости

$$P_g^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i. \tag{6}$$

С учетом рассмотренных положений укрупненный алгоритм расчёта вероятности P_j в каждой i -той реализации модели включает следующие операции [8, 9]:

- 1) моделирование случайного события, состоящего в реализации своего функционала (A_j) (или не реализации A_j) j -го структурного элемента графа. Используется программный датчик, генерирующий случайные числа, распределенные на интервале $[0,1]$ в соответствии с одним из априорно известным законом распределения (рис. 5). Данная операция осуществляется для всех j . При этом, если полученное с датчика число $x_j \leq P_j$, то событие \bar{A}_j считается наступившим, а бернуллиевой

переменной I_j присваивается значение 0 (в противном случае $I_j = 1$).

- 2) соответствии с зависимостями (4) вычисляются значения всех бернуллиевых переменных, описывающих состояние различных способов реализации моделируемого процесса функционирования сети электроснабжения от итогового события к исходному, т.е. $1_a, 1_b$ и т.д.
- 3) с использованием выражения (5) определяется значение переменной I_p , посредством которой описывается случайное событие, состоящее в существовании хотя бы одного пути от высшего элемента энергетической схемы к исполнительному элементу в i -той реализации процесса.

Определение количества реализаций статистической модели N может быть осуществлено с учетом следующих положений. Известно, что частота P^* представляет собой случайную переменную, описываемую β -распределением с плотностью вероятности

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{B(\lambda, \eta)} x^{\lambda-1} (1-x)^{\eta-1}, & (7) \\ 0 & \end{cases}$$

$\frac{1}{B(\lambda, \eta)} x^{\lambda-1} (1-x)^{\eta-1}$ — при $0 < x < 1$; 0 — при $x \geq 1, x \geq 0$, где λ, η — параметры формы; $B(\lambda, \eta)$ — бета-функция.

Математическое ожидание и дисперсия β -распределения выражаются соответственно зависимостями:

$$m_x = \frac{\lambda}{\eta + \lambda}, \quad (8)$$

$$D_x = \frac{\eta\lambda}{(\eta + \lambda)^2 (\eta + \lambda + 1)}.$$

Непосредственное использование β -распределения для определения объёма статистических экспериментов является затруднительным. Вместе с тем, в силу центральной предельной теоремы частота P^* при достаточно большом N имеет распределение близкое к нормальному. Поэтому при $n \rightarrow \infty$ справедливы выражения:

$$P(|P^* - P| \leq E) = d; \quad (9)$$

$$E = t_{\alpha} \sigma,$$

где α — доверительная вероятность;

t_{α} — квантиль нормального распределения, соответствующий заданному значению α и определяемый по таблицам.

С учетом данного положения необходимое число реализаций статистической модели оценивается по зависимости:

$$N \geq t_{\alpha}^2 \frac{P_g^{**} (1 - P_g^{**})}{E^2}, \quad (10)$$

где P_g^{**} — предварительная оценка P_g по количеству реализаций статистической модели $N^{**} \geq 30$.

Перейдем в выражении от абсолютной точности E к относительной точности $\delta = E / P$. Тогда выражение (10) примет следующий вид [68–70]:

$$N = \frac{t_{\alpha}^2 (1 - P)}{P \delta^2} \approx \frac{t_{\alpha}^2}{P \delta^2}, \quad (11)$$

откуда видно, что при малых P очень значительно возрастает N .

Оценка среднего значения показателя W по множеству реализаций N определяется как

$$m_w^* = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N W_j, \quad (12)$$

где W_j — значение показателя эффективности в j -м эксперименте.

Как и в предыдущем случае имеем

$$P(|W - m_w^2| \leq t_{\alpha} \delta_w / \sqrt{N}) = \alpha, \quad (13)$$

Откуда

$$N = \frac{t_{\alpha}^2 \delta_w^{**2}}{E^2}, \quad (14)$$

где δ_w^{**2} — оценка дисперсии δ_w^2 при $N^{**} \geq 30$.

После проведения установленного количества N реализаций по зависимости (6) определяется искомая статистическая оценка P_g^* .

Основным преимуществом рассмотренной модели является её простота, универсальность (исследуются ориентированные и неориентированные графы), а также возможность распространения её на случай исследования процессов, содержащих значительное количество структурных элементов (путем последовательной декомпозиции исходной структуры).

Возможности данного подхода иллюстрируют графики, полученные с использованием варианта информационной структуры, изображенной на рисунке 7.

На рисунке 8 представлены зависимости, позволяющие оценить значительность вклада различных типов структурных элементов сети электроснабжения (1 — вершин, соответствующих вероятностям безотказной работы сети в прямых связях между уровнями, 2 — линий связи между элементами уровней иерархии и 3 — элементов, связывающих вершины одного уровня

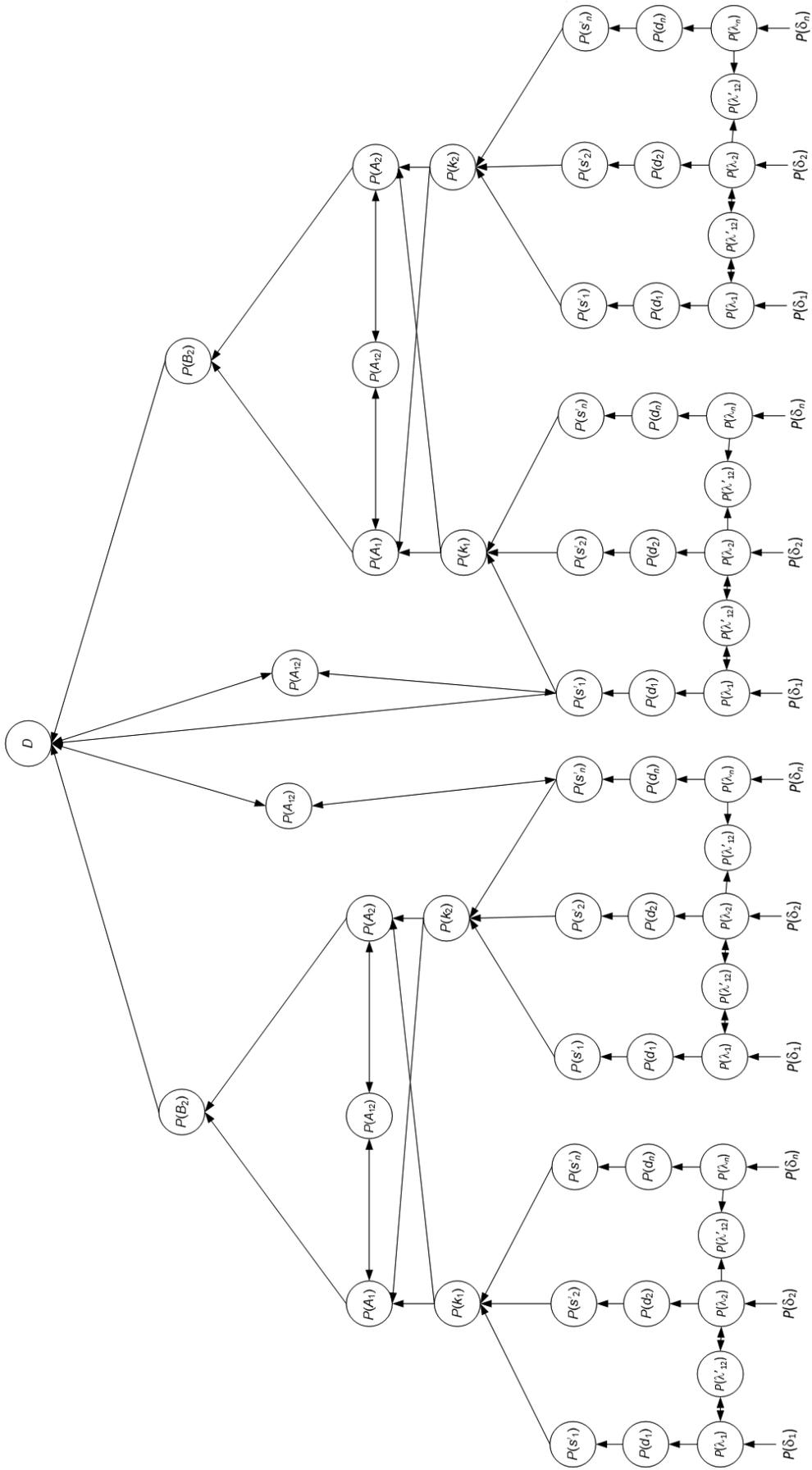


Рис. 7. Фрагмент графоаналитической модели электроэнергетической инфраструктуры двух регионов

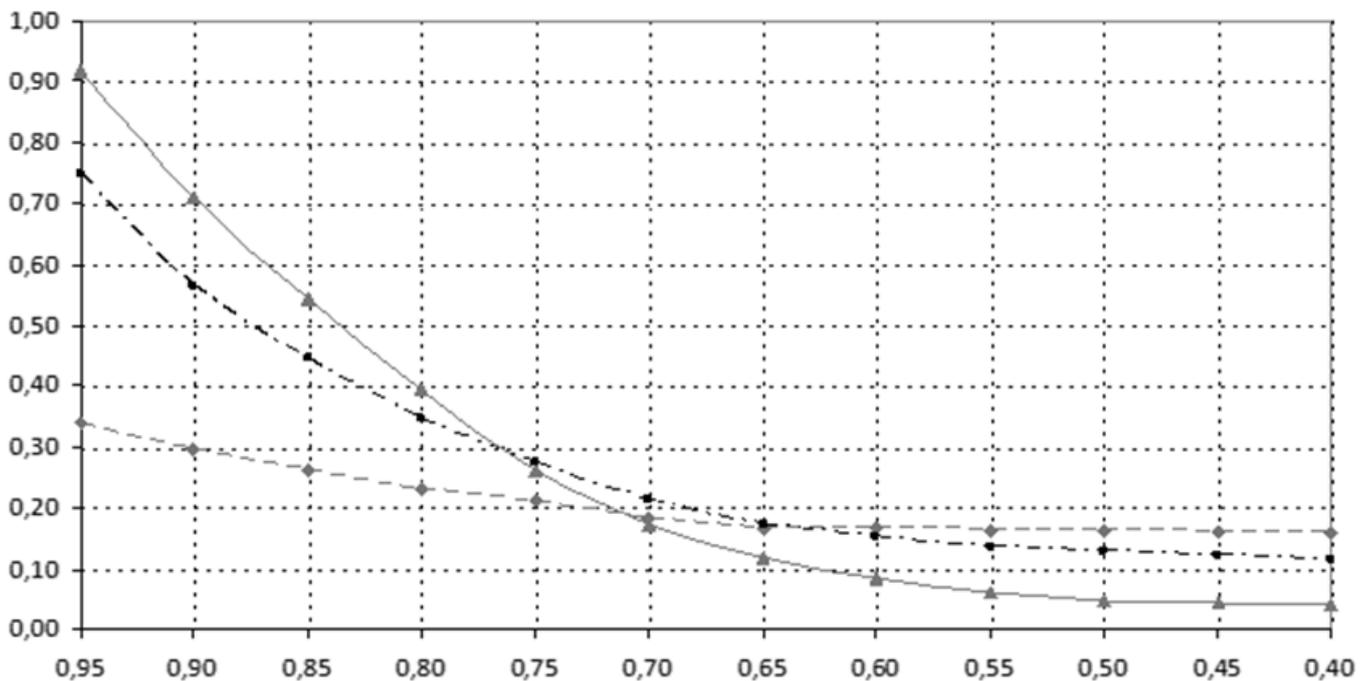


Рис. 8. Зависимость вероятности правильного функционирования всей сети электроснабжения от вероятностей безотказной работы и правильного функционирования элементов модели инфраструктуры сети, отображенной на рисунке 7

в показатель эффективности системы (в нашем случае — вероятность функционирования всей сети не ниже заданной и электрические параметры сети используются в целях распознавания) при различных вероятностях элементов 3-х типов и прочих равных условиях.

Для инициации входов использовался датчик случайных чисел в интервале (0,1), моделирующий случайное событие, состоящее в появлении или не появлении на одном из входов модели выхода значения электрического параметра за пределы двустороннего допуска.

Из анализа графических зависимостей на рисунке 8 следует, что в оценочных расчетах вкладом структурных элементов третьего типа (линий связи между элементами одного уровня) в показатель эффективности системы

электроснабжения можно пренебречь, что свидетельствует о достаточной энерго-обеспеченности по прямым связям, которые оказываются резервированными, а надежность элементов сети существенно влияют на вероятность правильного функционирования всей сети.

Таким образом, представленная модель статистического имитационного анализа информационных цепей и процессов функционирования электросети позволяет для заданного уровня частных показателей эффективности каких-либо формализованных этапов процесса электроснабжения оценить (в статистическом смысле) диапазон изменения характеристик элементов данного процесса (или его структурных характеристик), который обеспечивают заданные значения итоговых показателей эффективности системы электроснабжения, в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авгушевич И. В. Терминологический справочник по электроэнергетике / И. В. Авгушевич, Э. К. Аракелян, А. Г. Фишов. — М.: КЕМ, 2008. — 912 с.
2. Интеллектуальные электрические сети: компьютерная поддержка диспетчерских решений / Ю. Я. Любарский, А. Ю. Хренников. — М.: ИНФРА-М, 2021. — 160 с.
3. Умные сети и интеллектуальные энергетические системы. [Электронный ресурс]. — URL: <http://venture-biz.ru/energetika-energoberezhnie/290-intellektualnye-seti> (дата обращения: 26.06.2025).
4. Вережкин А. П., Муртазин Т. М. Искусственный интеллект в задачах моделирования, управления, диагностики технологических процессов. — М.: Вологда: Инфра-инженерия, 2023. — 232 с.
5. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. М.: Физматлит, 2022. — 816 с.
6. Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures: Deterioration Processes and Standard Test Methods. Vol. 1 / eds C. Maierhofer, H. W. Reinhardt, G. Dobmann. Berlin: BAM, 2020. — 624 p.
7. Ломоносов М. В. Схема Бернулли с замыканием, Пробл. передачи информ., 1974, том 10, вып. 1. — С. 91–101.
8. Райгородский А. М. Случайные графы // Математика в задачах, М.: МЦНМО, 2009. — С. 312–315.
9. Bollobás B. Riordan O. The diameter of a scale-free random graph // Combinatorica. 2004. V. 24, №1. — P. 5–34.

РАЗРАБОТКА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО TELEGRAM-БОТА КАК ЕДИНОГО ШЛЮЗА К РАЗНООБРАЗНЫМ НЕЙРОСЕТЯМ

DEVELOPMENT OF A MULTIFUNCTIONAL TELEGRAM BOT AS A UNIFIED GATEWAY TO DIVERSE NEURAL NETWORKS

**D. Pavlyuk
I. Yakovlev**

Summary. This article is dedicated to the development of a multifunctional Telegram bot that acts as a unified gateway to various neural network technologies. The primary objective of the research is to address the pressing problems of fragmentation and geographical restrictions faced by users of AI services. The project aims to create a centralized platform that integrates both official APIs from leading companies (OpenAI, Google, Anthropic) and numerous third-party providers under a single, intuitive interface, making advanced technologies accessible to a wide audience. To achieve this goal, a modular asynchronous architecture was implemented in Python, utilizing the Aiogram 3 framework for Telegram API interaction and an SQLite database for data storage. The system is designed for deployment in Docker containers, enabling it to function effectively as a proxy gateway. As a result, a bot with extensive multimodal capabilities was developed: it supports text dialogues, image generation, editing, and analysis, audio transcription, and text extraction from documents. Special attention is given to the project's key outcome: the creation of a full-featured administrative interface directly within Telegram. Unlike counterparts with static configurations, this solution allows an administrator to dynamically add and remove AI models, manage user access, and send broadcasts without editing the source code or restarting the application. This flexibility and scalability are the main competitive advantages, making the bot a powerful and easily manageable tool.

Keywords: Telegram bot, neural networks, API integration, unified gateway, multimodality, Aiogram, Python, Docker.

Павлюк Даниил Артемович

Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ
liketoeatpizza19@gmail.com

Яковлев Игорь Владимирович

Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ
iakovleviv@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена теме разработки многофункционального Telegram-бота, выступающего в роли единого шлюза к разнообразным нейросетевым технологиям. Основная цель исследования — решение актуальных проблем раздробленности и географических ограничений, с которыми сталкиваются пользователи AI-сервисов. Проект направлен на создание централизованной платформы, которая объединяет под одним интуитивно понятным интерфейсом как официальные API от ведущих компаний (OpenAI, Google, Anthropic), так и множество сторонних провайдеров, делая передовые технологии доступными для широкой аудитории. Для достижения этой цели была применена модульная асинхронная архитектура на языке Python с фреймворком Aiogram 3 для взаимодействия с Telegram API и базой данных SQLite для хранения данных. Система спроектирована для развертывания в контейнерах Docker, что позволяет ей эффективно функционировать как прокси-шлюз. В результате был реализован бот, обладающий широкими мультимодальными возможностями: он поддерживает текстовые диалоги, генерацию, редактирование и анализ изображений, транскрипцию аудио, а также извлечение текста из документов. Особое внимание уделяется ключевому результату проекта — созданию полнофункционального административного интерфейса внутри Telegram. В отличие от аналогов со статической конфигурацией, данное решение позволяет администратору динамически, без редактирования исходного кода и перезапуска приложения, добавлять и удалять AI-модели, управлять доступом пользователей и выполнять рассылки. Эта гибкость и масштабируемость являются главным конкурентным преимуществом, превращая бота в мощный и легко администрируемый инструмент.

Ключевые слова: telegram-бот, нейронные сети, интеграция API, единый шлюз, мультимодальность, Aiogram, Python, Docker.

Введение

Сегодня нейронные сети используются повсюду, в результате чего появилось множество их разных и узкоспециализированных видов. Крупные компании, такие как Google, OpenAI и Anthropic, а также множество независимых разработчиков, открывают доступ к своим нейросетям через API [4, с. 397]. Каждая такая модель, будь то большая языковая модель, генератор изображений или система синтеза речи, имеет свои особенности, плюсы и минусы [3, с. 288]. Однако этот

бурный рост создал большую практическую проблему — раздробленность. Обычным пользователям и разработчикам приходится разбираться в этой сложной системе: работать с множеством API-ключей и переключаться между разными, часто несовместимыми, сервисами. Ситуация усложняется для пользователей из определенных географических регионов, включая Россию, где доступ ко многим ведущим мировым нейросетевым сервисам ограничен или полностью заблокирован. Именно поэтому создание единой точки доступа является особенно актуальной задачей. Такая система должна скрыть

от пользователя все технические трудности и стать надёжным шлюзом к глобальным технологиям на основе нейросетей.

Целью работы является разработка многофункционального Telegram-бота, который объединяет множество AI-сервисов в одном удобном интерфейсе. Новизна проекта заключается в уникальной возможности использовать одновременно несколько сторонних провайдеров, многие из которых работают на библиотеках, совместимых с OpenAI и Anthropic. При этом бот нативно поддерживает и официальные модели от Gemini, OpenAI и Claude. Добавление новых сторонних провайдеров происходит очень просто через переменные окружения. Кроме того, администратор может добавлять и настраивать модели прямо из интерфейса бота, без вмешательства в код. Это ключевая возможность, так как сторонние провайдеры часто предоставляют доступ к мощным моделям бесплатно, делая технологию доступной для широкого круга пользователей.

В качестве системы управления базами данных была выбрана SQLite, доступ к которой осуществляется через высокопроизводительную асинхронную библиотеку aiosqlite [9; 12, с. 34]. Несмотря на кажущуюся простоту файловой СУБД, структура базы данных была тщательно спроектирована для поддержки всего многообразия функций бота и оптимизирована для асинхронного доступа. Она состоит из нескольких ключевых, нормализованных таблиц (Рис. 1). Таблицы `allowed_users` и `admin_users` хранят целочисленные идентификаторы пользователей Telegram, реализуя простую, но эффективную ролевую модель и систему контроля доступа. Отдельный блок таблиц отвечает за управление AI-

моделями, сгруппированными по модальностям: `models` для текстовых чатов, `whisper_models` для транскрипции голосовых сообщений, а также `image_generation_models` и `image_recognition_models` для генерации и анализа изображений соответственно. Каждая запись в этих таблицах содержит уникальный идентификатор модели, ее человекочитаемое имя для отображения пользователю и строковый идентификатор типа API, к которому она относится. Такая нормализация позволяет администратору гибко и атомарно управлять пулом доступных моделей. Центральной и самой сложной таблицей является `user_contexts`. Она спроектирована как хранилище полного состояния сессии каждого пользователя. Каждая строка, индексированная по `user_id`, содержит всю необходимую информацию для мгновенного восстановления контекста: выбранную пользователем модель, тип API, полную историю сообщений, сериализованную в формат JSON, текущие настройки для генерации изображений, такие как соотношение сторон и флаг улучшения промпта, выбранный голос для синтеза аудиоответов и системную роль, определяющую «личность» бота. Для обеспечения высокой производительности запросов, особенно к таблице `user_contexts`, были созданы B-Tree индексы по всем ключевым полям, по которым происходит фильтрация, в первую очередь по `user_id`, `model` и `api_type`.

Пользовательский интерфейс бота был спроектирован с упором на максимальную простоту, интуитивность и отзывчивость. Он активно использует все доступные инструменты Telegram для создания богатого интерактивного опыта. Основное взаимодействие пользователя с ботом происходит через постоянную клавиатуру, которая предоставляет доступ к главным функциям и избав-

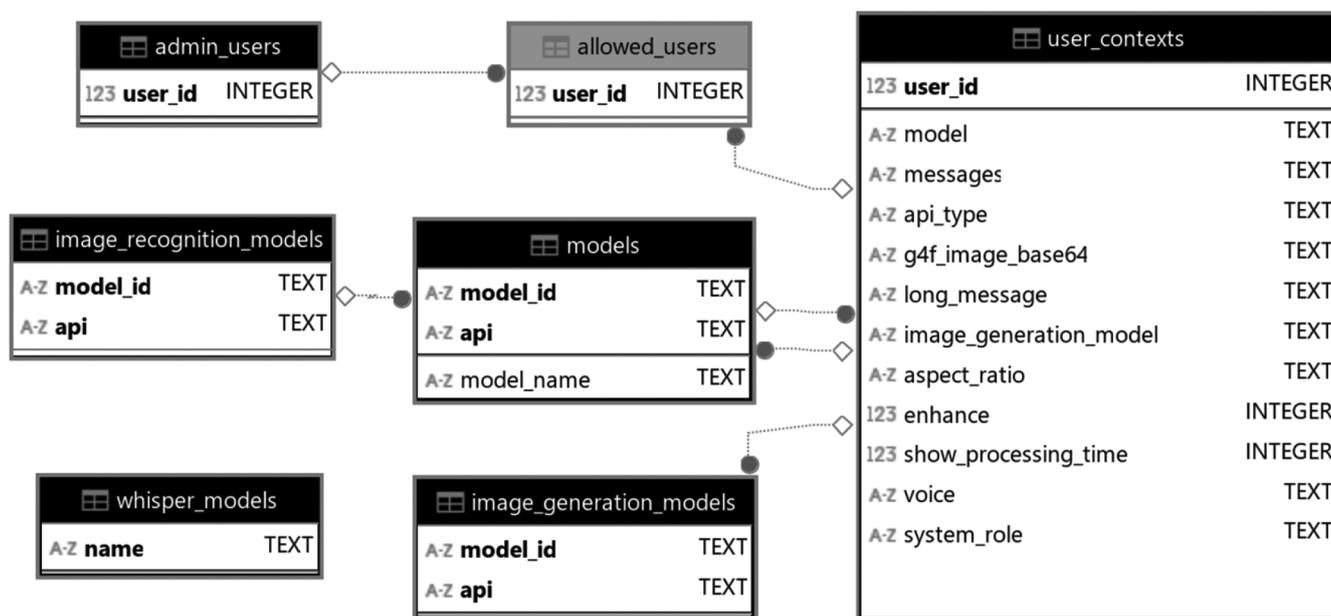


Рис. 1. Диаграмма структуры базы данных

ляет пользователя от необходимости запоминать и вводить текстовые команды.

Кнопка Настройки открывает меню для детальной конфигурации. Здесь пользователь может изменить языковую модель для общения, выбрать модель для генерации изображений, настроить соотношение сторон создаваемых картинок, указать голос для аудиоответов и определить системную роль бота. Кнопка Очистить полностью сбрасывает контекст текущей беседы, удаляя все предыдущие сообщения, но при этом сохраняя все пользовательские настройки. Кнопка Сгенерировать переводит бота в режим ожидания текстового запроса для создания изображения или инструкций для его редактирования. Другие элементы главного меню также предоставляют быстрый доступ к ключевым возможностям. Кнопка Поиск активирует режим поиска в интернете, где следующее сообщение пользователя будет использовано как поисковый запрос для формирования развернутого ответа. Кнопка Аудио переводит бота в режим ожидания аудиофайла для его последующей транскрипции. Кнопка Длинное сообщение включает режим накопления текста, позволяя объединять несколько сообщений в одно большое для последующей обработки. Кроме того, пользователям доступны развлекательные функции через кнопки Мем и Игры.

Особого внимания заслуживает процесс выбора модели, который иллюстрирует принцип контекстозависимых диалогов. Для более сложных и многовариантных сценариев используются динамически генерируемые инлайн клавиатуры. Например, при нажатии на кнопку выбора модели инициируется продуманный каскадный диалог (Рис. 2). Сначала пользователю предлагается выбрать API, например G4F, Gemini или OpenAI, и только после этого выбора ему показывается отфильтрованный

список моделей, относящихся к данному API. Такой подход предотвращает информационную перегрузку пользователя и делает процесс выбора быстрым и логичным.

Для администратора бота предусмотрен отдельный, защищенный правами доступа, интерфейс, предоставляющий полный контроль над системой без необходимости редактировать код (Рис. 3). Администратор может динамически управлять доступом к боту, добавляя новых пользователей и удаляя существующих. Ключевой возможностью является управление пулом моделей искусственного интеллекта на лету. Администратор может добавлять и удалять модели для чата, генерации и распознавания изображений через интуитивно понятный диалог, и все изменения немедленно отражаются в базе данных. Также реализованы функции для массовых рассылок всем пользователям и отправки точечных сервисных сообщений для информирования и поддержки. Весь интерфейс, от главного меню до многоуровневой административной панели, построен на принципе последовательного раскрытия информации, что делает даже самые сложные операции доступными и понятными.

Функциональные возможности системы

Разработанный бот представляет собой комплексную мультимодальную платформу, функциональность которой выходит далеко за рамки стандартного текстового взаимодействия. Система предоставляет пользователям широкий набор инструментов для работы с различными типами данных, делая его универсальным решением для множества задач.

Одной из ключевых возможностей является глубокая работа с изображениями. Система поддерживает как распознавание, так и генерацию визуального контента.

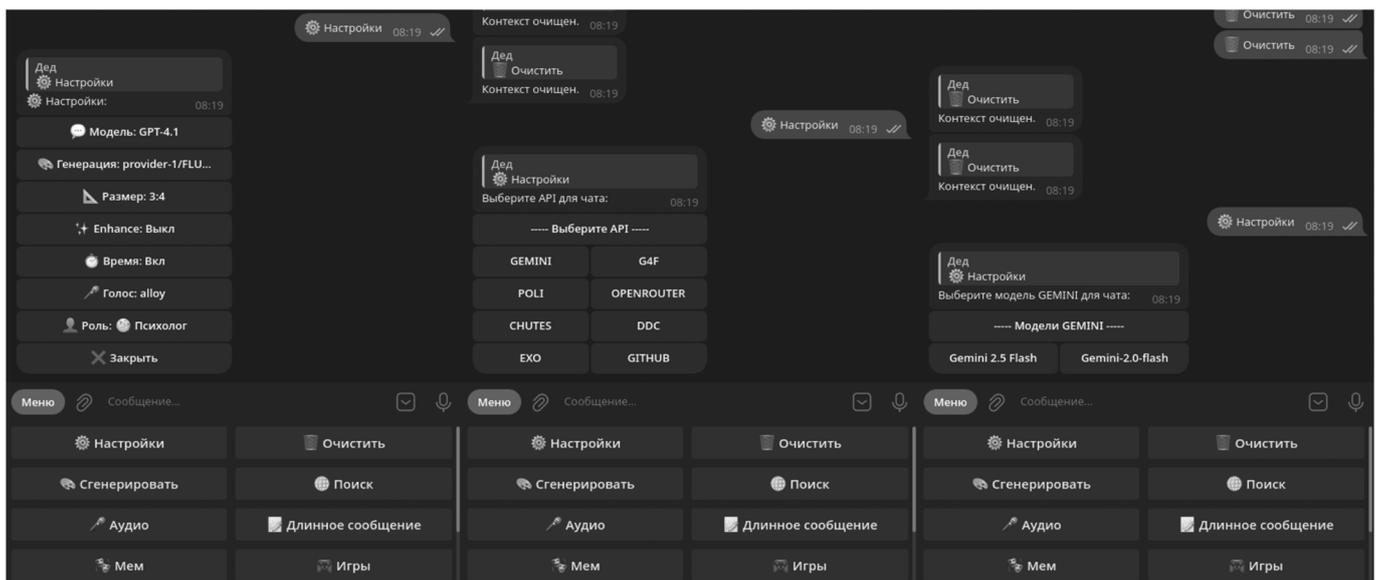


Рис. 2. Визуализация пользовательского пути для смены модели

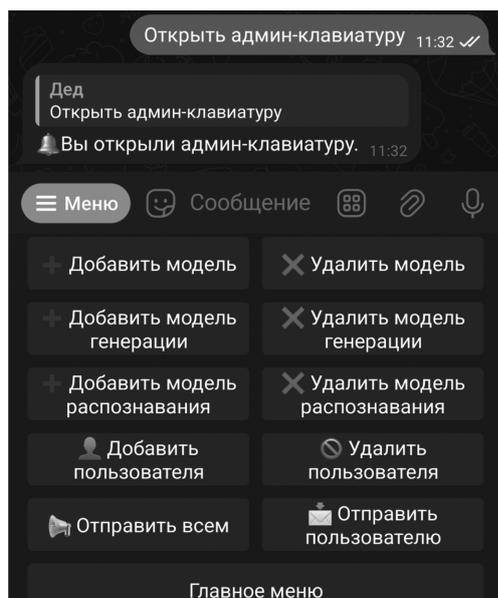


Рис. 3. Меню администратора

Пользователь может отправить изображение вместе с текстовым запросом, после чего бот использует выбранную нейросетевую модель для анализа картинки и ответа на вопрос (Рис. 4). Эта функция реализована с поддержкой нескольких провайдеров, включая Google, OpenAI и Anthropic.

Для генерации изображений пользователь активирует соответствующий режим и вводит текстовое описание. Система обладает двумя важными механизмами улучшения запроса. Во-первых, для достижения наилучшего качества генерации, особенно с моделями, обученными на англоязычных данных, запрос пользователя автоматически переводится на английский язык. Во-вторых, при активации специальной опции Enhance, простой пользовательский запрос передается вспомогательной языковой модели, которая преобразует его в развернутое и детализированное описание, структурированное по профессиональным стандартам, включая указания на ракурс, стиль и технические параметры съемки.

Отдельного внимания заслуживает функция редактирования изображений, реализованная на базе моделей Google Gemini (Рис. 5). Этот мощный инструмент позволяет пользователю отправлять одно или несколько изображений, сопровождая их текстовыми инструкциями по изменению. Система формирует сложный мультимодальный запрос, объединяя визуальные данные и текстовые команды, и направляет его в API Gemini. В результате модель возвращает новое изображение, измененное в точном соответствии с указаниями пользователя, что открывает широкие возможности для креативной работы и быстрой коррекции визуального контента.

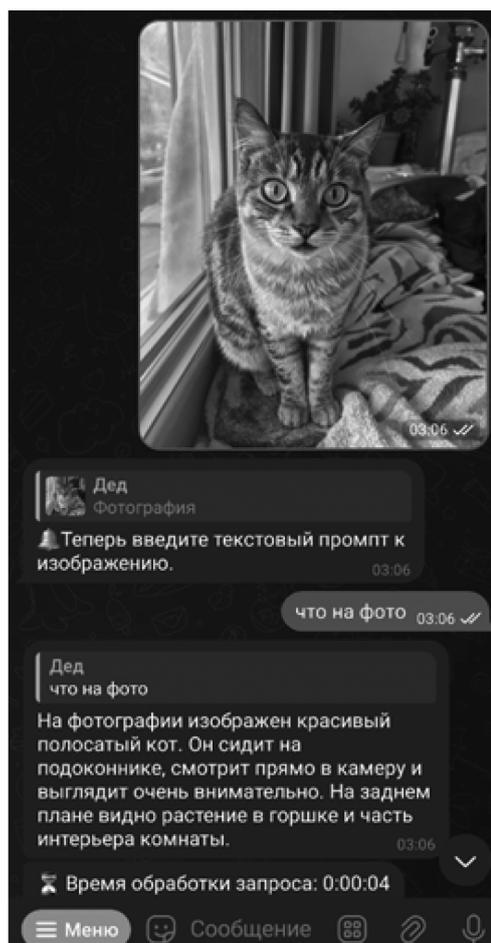


Рис. 4. Анализ фотографий

Система также способна извлекать текстовое содержимое из разнообразных форматов документов. Реализована поддержка файлов PDF, документов Microsoft Word современных версий DOCX и устаревших DOC, а также таблиц Microsoft Excel. Столь широкая совместимость достигается за счет интеграции специализированных библиотек, таких как PyMuPDF для обработки PDF и python-docx для работы с файлами Word [8, с. 225; 1]. Для обеспечения совместимости с устаревшими форматами система прибегает к помощи внешних утилит, например antiword и LibreOffice, которые запускаются в фоновом режиме. Извлеченный из файла текст интегрируется в текущий диалог, позволяя пользователю обсуждать содержимое документа с нейросетью.

Значительное внимание уделено и работе со звуком. Система предлагает две различные аудиофункции (Рис. 6). Первая это транскрибация аудиосообщений. Пользователь может отправить голосовое сообщение или аудиофайл, который будет обработан передовой технологией распознавания речи, такой как Whisper, для получения точной текстовой расшифровки. Второй, более уникальной функцией, является прямое аудиовзаимодействие с моделью openai-audio. В этом режиме голосовое сообщение пользователя не транскрибируется,

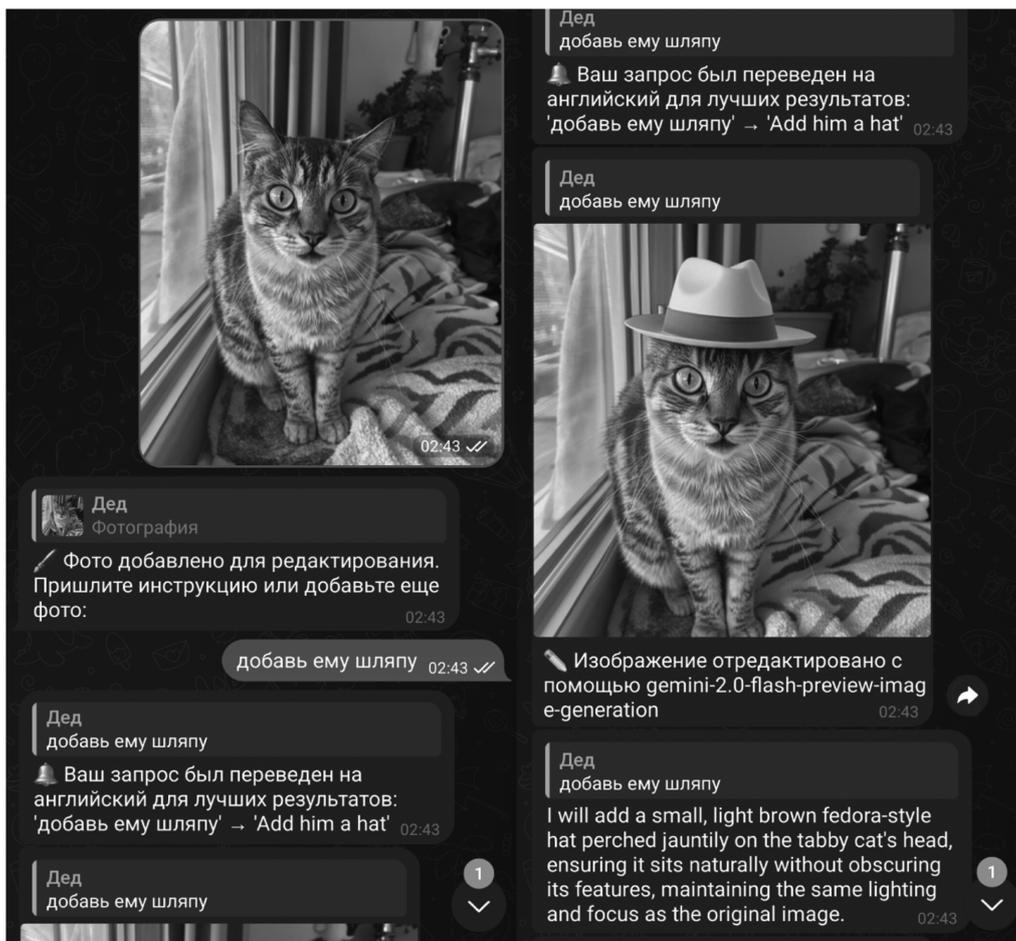


Рис. 5. Редактирование фото с помощью модели Gemini

а напрямую передается нейросети, которая в ответ генерирует не текст, а полноценный звуковой файл. Система автоматически выполняет необходимое преобразование формата аудио для его корректного воспроизведения в мессенджере Telegram.

Помимо основных рабочих функций, в боте предусмотрен развлекательный блок для повышения вовлеченности пользователей. Интегрирована функция получения случайных мемов из внешних интернет-источников. Также реализованы классические игры, например Крестики-нолики и Угадай число. Эти игровые механики полностью работают внутри интерфейса бота, используя машину конечных состояний для управления игровым процессом и предоставления интерактивного опыта без необходимости покидать приложение.

Заключение

В ходе выполненной работы был успешно разработан и реализован многофункциональный Telegram-бот, который представляет собой единый шлюз к разнообразным нейросетевым технологиям. Проект достиг поставленной цели, решив ключевую проблему раздробленности AI-сервисов и географических ограничений доступа.

Созданная система эффективно объединяет под одним интерфейсом как официальные модели от ведущих мировых компаний, так и множество сторонних провайдеров, что делает передовые технологии доступными для широкого круга пользователей. Уникальная архитектура, основанная на динамическом управлении моделями через базу данных и административный интерфейс непосредственно в Telegram, обеспечивает беспрецедентный уровень гибкости и масштабируемости, выгодно отличая данное решение от существующих аналогов со статической конфигурацией.

Вопрос масштабируемости также заслуживает внимания. Хотя текущая асинхронная архитектура и использование пула соединений с базой данных SQLite хорошо справляются с нагрузкой, при экспоненциальном росте числа пользователей могут возникнуть узкие места. Переход на более мощную клиент-серверную базу данных, например PostgreSQL, и реализация архитектуры с несколькими рабочими процессами, распределяющими нагрузку, позволили бы обеспечить бесперебойную работу при значительном росте числа пользователей и одновременных запросов.

Еще одним аспектом для будущего развития является отсутствие встроенной системы управления затратами

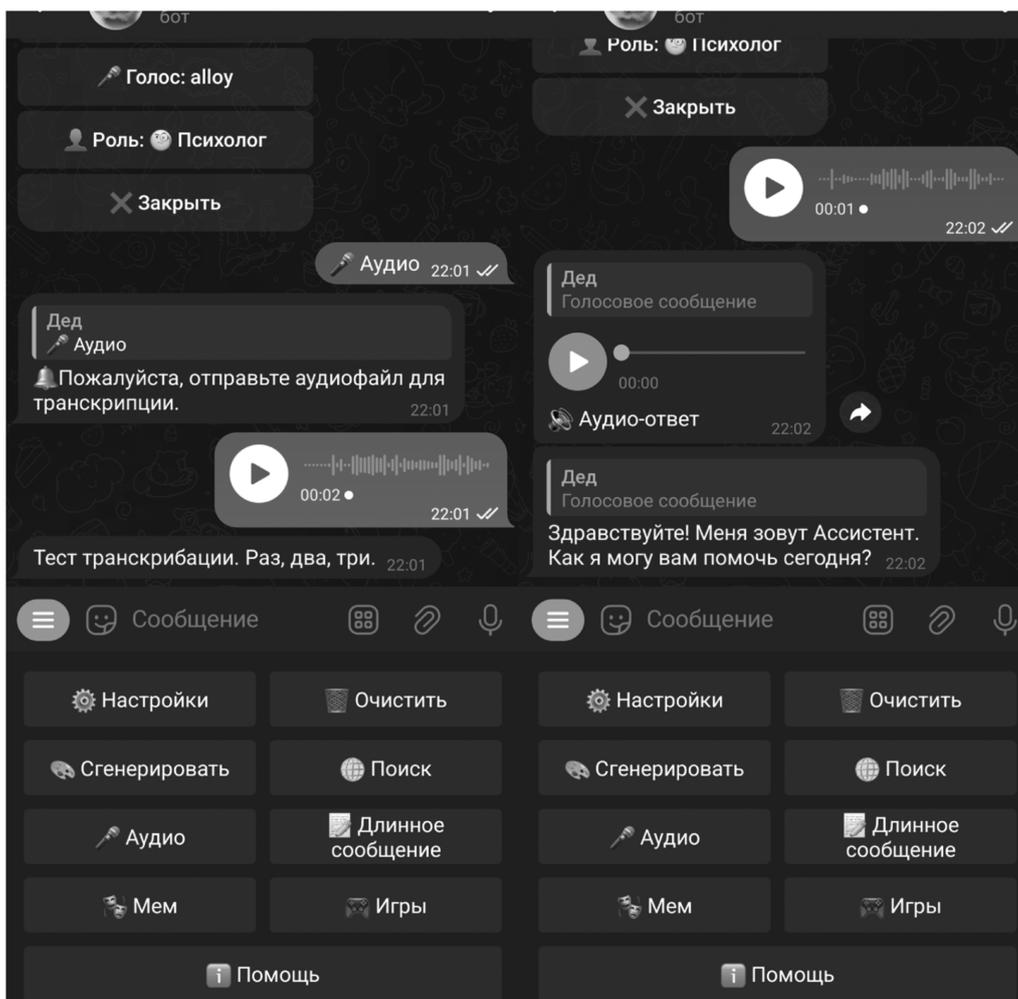


Рис. 6. Работа с аудиофайлами

на использование платных моделей от официальных API. Сейчас эта задача полностью ложится на администратора. Интеграция системы биллинга и персональных лимитов для пользователей могла бы превратить проект в самодостаточную платформу, предлагающую гибкие тарифные планы доступа к премиальным нейросетям. Наконец, повышение общей надежности и улучшение пользовательского опыта представляют собой важные задачи. Разработка более продвинутой системы обработки ошибок, которая бы предоставляла пользователям понятную обратную связь вместо технических сооб-

щений, сделало бы взаимодействие с ботом еще более комфортным и предсказуемым.

Таким образом, созданный бот является не только готовым к использованию решением, но и прочным фундаментом для создания еще более мощной и всеобъемлющей экосистемы искусственного интеллекта, доступной широкому кругу пользователей. Определенные пути для дальнейшего развития открывают большие перспективы для превращения этого проекта в стабильный и коммерчески успешный продукт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валиев А.И., Лысенкова С.А. Применение методов машинного обучения для автоматизации процесса анализа содержания текста // Вестник кибернетики. 2021. №4 (44).
2. Валинурова А.А., Балабанова Н.В., Маценков И.А. Алгоритм разработки Telegram-бота — продуктивного помощника современного бизнеса // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2023. №2 (74). С. 60–67.
3. Жусип М.Н., Жаксыбаев Д.О. Сравнение чат-ботов с использованием трансформеров и нейросетей: исследование применения архитектур gpt и bert // Вестник науки. 2024. Т. 2, №9 (78). С. 287–290.
4. Измайлов М.К. Применение искусственного интеллекта для оптимизации рутинных административных задач: возможности, проблемы и перспективы // Вестник ПГУ. Серия: Экономика. 2024. Т. 19, №4. С. 395–408.
5. Клоков М.Г. Разработка Telegram-бота для управления напоминаниями с использованием Python // Вестник науки. 2025. Т.2, №5 (86) С. 824–831.

6. Насибулин Р.О., Сафонова Е.А., Абдуллин Д.М., Гареева Г.А. Оптимизация инвентарного учета основных средств путем создания Telegram бота // International Journal of Advanced Studies. 2023. Т.13, №1. С. 90–101.
7. Пирматов А.З., Азимов Б.А., Камалов С.С. Искусственный интеллект с использованием Python: технологии и применение // Бюллетень науки и практики. 2023. Т. 9. №11. С. 288–295.
8. Редькина О.Ю., Карпета Т.В., Пономарева Д.С., Вершинина Д.А. Машинное обучение при адаптации учебных текстов: лексический аспект // Вестник ЧелГУ. 2024. №8 (490). С. 220–229.
9. Сударенко Д.А. Разработка базы данных структурно-параметрического описания технологии LTCC с применением Qt SQLite // Труды МАИ. 2021. №121.
10. Токарев Э.А., Галимянов Ф.А. Структурирование обработчиков в telegram-ботах для оптимизации взаимодействия // Вестник науки. 2024. Т.1, №5 (74). С. 523–532.
11. Фаррахов И.Г., Якупов И.М. Автоматизированный инструментарий развертывания облачных сервисов // Мировая наука. 2021. №2 (47). С. 115–118.
12. Химич А.В. К вопросу о реализации баз данных в языке программирования Python // Ученые записки Брянского государственного университета. 2020. №2 (18). С. 33–35.
13. ChatGPT-Telegram-Bot [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://github.com/yum68686/ChatGPT-Telegram-Bot> (дата обращения: 01.07.25)
14. Grok-ChatGPT: Telegram bot with multiple AI models (GPT-4O, Grok) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://github.com/mirvald-space/Grok-ChatGPT> (дата обращения: 01.07.25)
15. TG AI Bot: Telegram bot powered by the Vercel AI SDK [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://github.com/meetpateltech/tg-ai-bot> (дата обращения: 01.07.25)

© Павлюк Даниил Артемович (liketoeatpizza19@gmail.com); Яковлев Игорь Владимирович (iakovleviv@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

AUTOMATED SYSTEM FOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF CAPITAL CONSTRUCTION FACILITIES BASED ON DIGITAL TECHNOLOGIES

M. Paramonov

Summary. This work is dedicated to developing an automated process control system (APCS) for comprehensive assessment of the technical condition of capital construction facilities based on modern digital technologies. The research includes creating an integrated software and hardware complex that combines Internet of Things (IoT) technologies, real-time monitoring systems, and predictive analytics methods. An automated system implementing the principles of a digital twin of a building using Building Information Modeling (BIM/TIM) technology is proposed. The developed APCS provides automation of data collection, processing, and analysis processes regarding the technical condition of buildings, enabling a transition from periodic maintenance to predictive maintenance and significantly improving the efficiency of facility lifecycle management.

Keywords: automated process control system, APCS, digital twin, IoT, technical condition monitoring, predictive analytics, BIM technologies.

Парамонов Максим Юрьевич

Аспирант,
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет
Dozor97-19@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена разработке автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУТП) для комплексной оценки технического состояния объектов капитального строительства на основе современных цифровых технологий. Исследование включает создание интегрированного программно-технического комплекса, объединяющего технологии Интернета вещей (IoT), системы мониторинга в реальном времени и методы предиктивной аналитики. Предложена автоматизированная система, реализующая принципы цифрового двойника здания с использованием технологии информационного моделирования (BIM/TIM). Разработанная АСУТП обеспечивает автоматизацию процессов сбора, обработки и анализа данных о техническом состоянии зданий, что позволяет перейти от периодического обслуживания к прогнозируемому техническому обслуживанию и значительно повысить эффективность управления жизненным циклом объектов.

Ключевые слова: автоматизированная система управления технологическими процессами, АСУТП, цифровой двойник, IoT, мониторинг технического состояния, предиктивная аналитика, BIM-технологии.

Введение

Современная строительная отрасль России переживает период масштабной цифровой трансформации, инициированной государственными программами развития и требованиями перехода к цифровой экономике. Согласно утвержденной Правительством РФ стратегии развития строительной отрасли до 2030 года, власти взяли курс на полную автоматизацию всех этапов строительства и эксплуатации объектов, что должно привести к кардинальному изменению подходов к управлению техническим состоянием зданий [1]. Этот амбициозный план затрагивает не только возведение новых объектов с применением передовых технологий, но и критически важную сферу управления техническим состоянием существующего жилищного фонда, составляющего миллиарды квадратных метров по всей стране. Традиционные методы периодических осмотров и субъективных экспертных заключений уже не способ-

ны обеспечить требуемый уровень безопасности и эффективности эксплуатации в условиях ужесточающихся нормативных требований. Более того, человеческий фактор при принятии решений о необходимости технического обслуживания часто приводит к серьезным ошибкам в планировании ремонтных работ, что влечет за собой как избыточные затраты ресурсов, так и повышенные риски возникновения аварийных ситуаций. В этих условиях создание эффективных автоматизированных систем управления становится не просто желательным направлением развития, а острой необходимостью для обеспечения безопасности жизнедеятельности населения и рационального использования бюджетных средств.

Революционные изменения в сфере цифровых технологий открывают беспрецедентные возможности для кардинального пересмотра подходов к мониторингу технического состояния зданий и сооружений. Развитие технологий промышленного интернета вещей (IIoT) по-

зволяет создавать распределенные сети высокоточных датчиков, способных в режиме реального времени отслеживать малейшие изменения в состоянии критически важных элементов строительных конструкций [2]. Современные беспроводные датчики деформации, температуры, влажности и вибрации обеспечивают непрерывный сбор данных без необходимости прокладки кабельных сетей, что значительно упрощает их установку на существующих объектах. Параллельно с этим стремительное развитие методов машинного обучения и искусственного интеллекта создает возможности для анализа больших массивов данных мониторинга и выявления скрытых закономерностей в изменении технического состояния зданий. Интеграция этих технологий в единые автоматизированные системы управления технологическими процессами открывает путь к принципиально новому уровню управления жизненным циклом объектов капитального строительства. Такой подход позволяет не только своевременно выявлять потенциальные проблемы, но и прогнозировать их развитие, оптимизировать планы технического обслуживания и минимизировать риски аварийных ситуаций.

Особую роль в современных условиях играет концепция цифрового двойника здания, которая представляет собой качественно новый подход к управлению недвижимостью и технической эксплуатацией объектов. Цифровой двойник — это не просто статичная трехмерная модель здания, созданная на этапе проектирования, а динамическая интеллектуальная система, способная в реальном времени моделировать поведение физического объекта на основе постоянно поступающих данных от множества датчиков и систем мониторинга [3]. Такая система позволяет проводить виртуальные эксперименты, моделировать различные сценарии развития событий и принимать обоснованные решения по техническому обслуживанию без риска для реального объекта. Интеграция цифрового двойника с технологиями информационного моделирования (BIM/ТИМ) создает мощную платформу для управления всем жизненным циклом здания — от проектирования до демонтажа. В России технология цифровых двойников пока находится на начальной стадии внедрения, однако уже существуют успешные пилотные проекты, демонстрирующие высокую эффективность такого подхода. Согласно исследованиям MarketsandMarkets, мировой рынок цифровых двойников достиг в 2020 году 3,1 млрд долларов и к 2026 году может вырасти до 48,2 млрд долларов, что свидетельствует о колоссальном потенциале этой технологии.

Нормативно-правовая база Российской Федерации активно адаптируется к требованиям цифровой трансформации строительной отрасли, создавая прочный фундамент для внедрения автоматизированных систем мониторинга. Ключевым событием стало введение в действие с 1 мая 2024 года нового ГОСТ 31937–2024

«Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния», который заменил предыдущую версию стандарта и установил четкие требования к автоматизированному мониторингу различных категорий зданий [4]. Этот документ не только узаконил применение цифровых технологий в сфере технической эксплуатации, но и создал обязательные требования к автоматизированному мониторингу уникальных зданий и сооружений. Параллельно с этим Минстрой России утвердил национальный стандарт по технологиям информационного моделирования для жилых зданий, что создает единую методологическую базу для внедрения BIM-технологий на всех этапах жизненного цикла объектов. С июля 2024 года российские девелоперы обязаны использовать ТИМ-технологии при реализации проектов капитального строительства, что стимулирует развитие отечественных программных решений и создает предпосылки для массового внедрения цифровых двойников зданий. Эти нормативные изменения формируют благоприятную среду для развития автоматизированных систем управления техническим состоянием зданий и создают долгосрочные стимулы для инвестиций в цифровые технологии.

Анализ международного опыта показывает, что ведущие страны мира уже активно используют автоматизированные системы для управления техническим состоянием зданий, достигая значительных результатов в повышении эффективности эксплуатации и снижении аварийности. В Сингапуре, например, создана национальная система цифровых двойников зданий, охватывающая весь жилищный фонд города-государства и обеспечивающая автоматизированный мониторинг состояния конструкций с использованием более чем 50 тысяч IoT-датчиков различного типа. Великобритания реализует масштабную программу внедрения BIM-технологий во всех государственных строительных проектах, что позволило снизить стоимость эксплуатации зданий на 15–20 % и сократить время принятия решений по техническому обслуживанию в 3–4 раза. В США широко применяются системы предиктивной аналитики для прогнозирования отказов оборудования зданий, что позволяет переходить от планового к состоянию-ориентированному техническому обслуживанию с экономией до 30 % затрат на эксплуатацию. Однако прямое заимствование зарубежных решений для российских условий представляется невозможным из-за кардинальных различий в климатических условиях, конструктивных особенностях зданий, материалах конструкций и требованиях национальной нормативной базы. Российские здания эксплуатируются в значительно более суровых климатических условиях, что требует особого внимания к системам отопления, теплоизоляции и защиты от промерзания, а типовые конструктивные решения советского периода имеют специфические особенности, не характерные для зарубежного строительства.

Материалы и методы

Разработка автоматизированной системы управления технологическими процессами для комплексной оценки технического состояния зданий потребовала создания многоуровневой иерархической архитектуры, построенной в соответствии с принципами промышленной автоматизации и требованиями ГОСТ 34.003–90 «Автоматизированные системы. Термины и определения» [5]. Система спроектирована как трехуровневая пирамида управления, где каждый уровень выполняет специализированные функции и обеспечивает определенную степень автономности для повышения надежности и отказоустойчивости всего комплекса. Нижний полевой уровень включает в себя разнообразные датчики и исполнительные механизмы, размещенные непосредственно на контролируемых элементах здания: IoT-датчики деформации конструкций, температурно-влажностные сенсоры, акселерометры для измерения вибраций, инклинометры для контроля кренов и наклонов, а также интеллектуальные счетчики ресурсов с функциями диагностики состояния инженерных сетей. Средний контроллерный уровень реализован на базе промышленных программируемых логических контроллеров и промышленных компьютеров, обеспечивающих сбор данных от полевых устройств, их первичную обработку и передачу на верхний уровень управления. Верхний диспетчерский уровень представляет собой комплекс серверов и автоматизированных рабочих мест операторов, реализующих функции SCADA-системы, базы данных исторической информации, модули предиктивной аналитики и интерфейсы интеграции с внешними информационными системами предприятия.

Ключевым элементом разработанной системы стала математическая модель оценки технического состояния, основанная на иерархическом подходе к структурированию параметров мониторинга и их весовых коэффициентов. После тщательного анализа нормативных документов, включая СП 368.1325800.2017 и ВСН 53–86(р), а также изучения практического опыта эксплуатации зданий различных типов, была сформирована система из четырех укрупненных групп параметров, охватывающих все критически важные аспекты технического состояния объектов капитального строительства. Первая группа F1 «Инженерные системы» объединяет 21 параметр, характеризующий состояние систем жизнеобеспечения здания: горячего и холодного водоснабжения, отопления, вентиляции, канализации, газоснабжения, электроснабжения и пожаротушения, включая запорную арматуру и стояки всех систем. Вторая группа F2 «Архитектурные элементы» включает параметры состояния окон, отделочных покрытий помещений общего пользования и фасада здания. Третья группа F3 «Конструктивные элементы» охватывает наиболее критичные с точки зрения безопасности элементы: перекрытия, внутрен-

ние и несущие стены, двери, крышу и фундамент. Четвертая группа F4 «Эксплуатационные характеристики» учитывает такие факторы как год ввода в эксплуатацию, признание дома аварийным, общий износ здания, класс энергетической эффективности, состояние отопительных приборов и общее состояние дома.

Математическая формализация процесса оценки технического состояния основана на взвешенной сумме оценок групп параметров с учетом их относительной важности для безопасности эксплуатации здания. Комплексная оценка технического состояния здания W рассчитывается по формуле:

$$W = \sum_{j=1}^k A_j t_j$$

где A_j представляет весовой коэффициент j -ой группы параметров, определяемый экспертным путем с учетом региональных особенностей эксплуатации зданий, k — общее количество групп параметров, t_j — интегральная оценка текущего состояния j -ой группы параметров. Оценка состояния каждой группы параметров вычисляется как среднее арифметическое значение нормированных оценок входящих в нее отдельных параметров:

$$t_j = \sum_{i=1}^m w_{(j,i)} / m$$

где m обозначает количество параметров, включенных в j -ую группу, а $w_{(j,i)}$ представляет коэффициент, характеризующий текущее состояние i -ого параметра j -ой группы. Значения коэффициентов $w_{(j,i)}$ нормированы в диапазоне от 0 до 1, где 1 соответствует идеальному состоянию элемента, а 0 — критическому состоянию, требующему немедленного вмешательства.

Особое внимание при разработке математической модели было уделено учету временного фактора и физики процессов деградации строительных материалов и конструкций. Коэффициент состояния параметра $w_{(j,i)}$ определяется на основе нелинейной зависимости от времени эксплуатации элемента, учитывающей различные стадии жизненного цикла конструкций. Данная зависимость реализует трехзонную модель технического состояния: зона нормальной работоспособности (0– a), где техническое обслуживание не требуется и состояние элемента остается стабильным; зона ограниченной работоспособности (a – b), характеризующаяся постепенным ухудшением параметров и требующая планового технического обслуживания; критическая зона ($>b$), в которой работоспособность элемента приближается к нулю и требуется немедленное вмешательство для предотвращения аварийной ситуации. Границы зон определяются на основе нормативных требований, результатов натурных испытаний и статистического анализа данных эксплуатации аналогичных объектов. Такой подход позволяет автоматизированной системе не толь-

ко оценивать текущее состояние элементов, но и прогнозировать момент наступления критических состояний, оптимизируя планы технического обслуживания и минимизируя риски аварийных ситуаций.

Таблица 1.

Структура укрупненных групп параметров автоматизированной системы

Код	Название группы	Код параметра	Название параметра
F1	Инженерные системы	F1.1	Система ГВС
		F1.2	Вентиляция
		F1.3	Канализация
		F1.4	Газоснабжение
		F1.5	Система отопления
		F1.6	Запорная арматура системы ГВС
		F1.7	Запорная арматура системы отопления
		F1.8	Запорная арматура системы ХВС
		F1.9	Система водоотведения
		F1.10	Система водостоков
		F1.11	Система газоснабжения
		F1.12	Теплоснабжение
		F1.13	Система пожаротушения
		F1.14	Система ХВС
		F1.15	Система электроснабжения
		F1.16	Стояки системы ГВС
		F1.17	Стояки системы отопления
		F1.18	Стояки системы ХВС
		F1.19	Контроль температурного режима
		F1.20	Система вентиляции подвала
		F1.21	Аварийное электроснабжение
F2	Архитектурные элементы	F2.1	Окна
		F2.2	Отделочные покрытия помещений
		F2.3	Фасад

Код	Название группы	Код параметра	Название параметра
F3	Конструктивные элементы	F3.1	Перекрытия
		F3.2	Внутренние стены
		F3.3	Двери
		F3.4	Крыша
		F3.5	Несущие стены
		F3.6	Фундамент
F4	Эксплуатационные характеристики	F4.1	Год ввода в эксплуатацию
		F4.2	Признание дома аварийным
		F4.3	Общий износ здания
		F4.4	Класс энергетической эффективности
		F4.5	Отопительные приборы
		F4.6	Общее состояние дома

Программно-технический комплекс автоматизированной системы представляет собой интегрированное решение, объединяющее различные технологические платформы и обеспечивающее реализацию концепции цифрового двойника здания. Архитектура системы построена по модульному принципу, что обеспечивает гибкость конфигурирования под конкретные задачи и возможность поэтапного развертывания функциональности. Подсистема сбора данных реализована с использованием современных промышленных протоколов связи, включая Modbus RTU/TCP, OPC UA, MQTT и LoRaWAN, что обеспечивает совместимость с широким спектром датчиков и контроллеров различных производителей. Особое внимание уделено обеспечению кибербезопасности системы через применение современных методов шифрования данных, многоуровневой аутентификации пользователей и мониторинга попыток несанкционированного доступа. Подсистема обработки данных включает модули цифровой фильтрации сигналов, статистической обработки временных рядов, выявления аномалий и валидации достоверности поступающей информации. Алгоритмы предиктивной аналитики реализованы с использованием методов машинного обучения, включая регрессионный анализ, нейронные сети глубокого обучения и методы анализа временных рядов, что позволяет прогнозировать изменение технического состояния элементов здания с горизонтом от нескольких месяцев до нескольких лет. Подсистема визуализации обеспечивает интерактивное отображение состояния технологических систем здания в виде трехмерной модели, интегрированной с BIM-моделью объекта, что позволяет

операторам быстро локализовать проблемные участки и оценить масштаб необходимых работ.

Для оценки степени износа отдельных элементов и здания в целом в математической модели введены дополнительные соотношения, позволяющие автоматически рассчитывать показатели деградации на основе данных мониторинга. Степень износа i -ого элемента j -ой группы определяется как:

$$y_{j,i} = 1 - w_{j,i}$$

что обеспечивает интуитивно понятную интерпретацию результатов, где значение 0 соответствует новому элементу, а значение 1 — полностью изношенному элементу, требующему замены. Общая степень износа здания рассчитывается аналогично:

$$Y = 1 - W.$$

Такой подход позволяет получать сопоставимые оценки износа как для отдельных элементов, так и для здания в целом, что необходимо для принятия обоснованных решений о приоритетности проведения ремонтных работ и распределении ограниченных финансовых ресурсов.

Результаты и обсуждение

Экспериментальная проверка разработанной автоматизированной системы управления технологическими процессами проводилась в несколько этапов, включающих как анализ больших массивов данных, так и практические испытания на реальных объектах с полным комплексом оборудования мониторинга. Первоначальная валидация математической модели осуществлялась на основе данных о техническом состоянии более чем 30 тысяч многоквартирных домов, собранных из откры-

тых источников Министерства жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации с использованием специально разработанного программного инструмента автоматизированного сбора информации. Из общего массива данных была сформирована репрезентативная выборка, включающая 300 зданий различных серий, построенных в период с 1990 по 2019 годы, для которых имелась наиболее полная информация о техническом состоянии конструкций и инженерных систем. Отбор объектов для детального анализа производился с учетом географического распределения, конструктивных особенностей зданий, климатических условий эксплуатации и качества ведения технической документации, что позволило обеспечить статистическую значимость результатов исследования. Особое внимание уделялось проверке корректности исходных данных через сопоставление с результатами независимых технических обследований и актами приемки выполненных ремонтных работ. Анализ полученных результатов показал высокую точность разработанной автоматизированной системы при оценке технического состояния современных зданий, где среднее отклонение расчетных значений от фактических составляет менее 5 %, что соответствует требованиям инженерной точности для данного класса задач.

Детальный анализ результатов работы автоматизированной системы выявил интересные закономерности в точности прогнозирования технического состояния зданий различных возрастных групп, что имеет важное практическое значение для планирования технического обслуживания. Для зданий, введенных в эксплуатацию после 2000 года, система демонстрирует исключительно высокую точность с отклонением менее 3 %, что объясняется более высоким качеством строительства, применением современных материалов и соблюдением технологических требований при возведении. Здания 1990-х годов показывают несколько большую погрешность про-

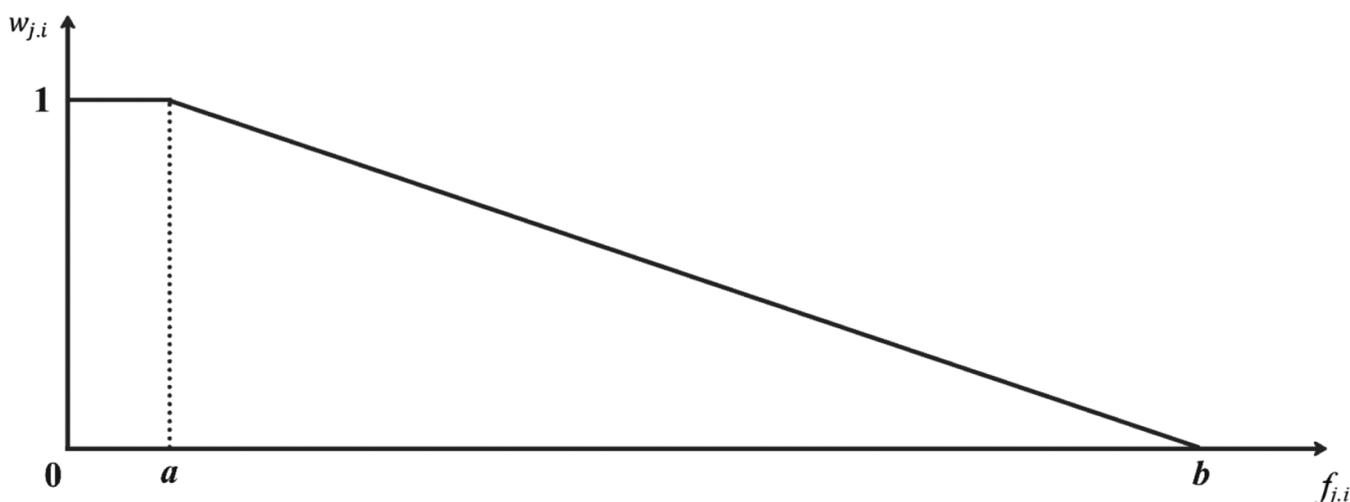


Рис. 1. Зависимость состояния технологического параметра от времени в автоматизированной системе

гнозирования (до 7 %), что связано с переходным периодом в строительной отрасли, когда происходило изменение нормативной базы и технологий строительства. Для зданий более ранних периодов постройки наблюдается увеличение погрешности до 10–12 %, что обусловлено влиянием множественных факторов: различия в качестве материалов, отклонения от проектных решений при строительстве, накопленные эффекты от проведенных ремонтов и модернизаций, а также воздействие внешних факторов, не всегда учитываемых в теоретической модели. Тем не менее, даже для зданий старших возрастных групп достигнутая точность является достаточной для практического применения системы в задачах планирования технического обслуживания и оценки приоритетности ремонтных работ. Статистический анализ распределения погрешностей показал нормальный характер их распределения, что подтверждает корректность выбранной математической модели и отсутствие систематических ошибок в алгоритмах расчета.

Дисперсионный анализ результатов работы автоматизированной системы позволил выявить основные факторы, влияющие на точность прогнозирования технического состояния зданий, и разработать рекомендации по повышению надежности системы. Наибольшее влияние на точность оценок оказывают полнота исходных данных о техническом состоянии здания, качество проведенных в прошлом ремонтных работ и особенности эксплуатации объекта. Здания, для которых ведется полная техническая документация с регулярным обновлением информации о состоянии конструкций и обо-

рудования, показывают значительно более высокую точность прогнозирования по сравнению с объектами, где документооборот ведется формально. Качество выполненных ремонтных работ также существенно влияет на точность системы: здания, где ремонты проводились с соблюдением технологических требований и использованием качественных материалов, демонстрируют более предсказуемое поведение технических параметров. Особенности эксплуатации, включающие режимы отопления, интенсивность использования помещений, своевременность проведения текущих ремонтов, создают дополнительную вариативность в состоянии зданий, которая учитывается системой через корректировочные коэффициенты. Географический фактор оказывает меньшее влияние на точность системы благодаря введению региональных весовых коэффициентов, учитывающих климатические особенности эксплуатации зданий в различных регионах России.

Практические испытания автоматизированной системы на объектах с полным комплексом IoT-датчиков и систем мониторинга в реальном времени продемонстрировали качественно новый уровень точности и надежности оценки технического состояния зданий. Второй этап экспериментальной проверки проводился на десяти многоквартирных домах различного типа, принадлежащих крупной управляющей компании, где была развернута полнофункциональная автоматизированная система с непрерывным мониторингом более чем 150 параметров технического состояния каждого здания. Установленное оборудование включало датчики

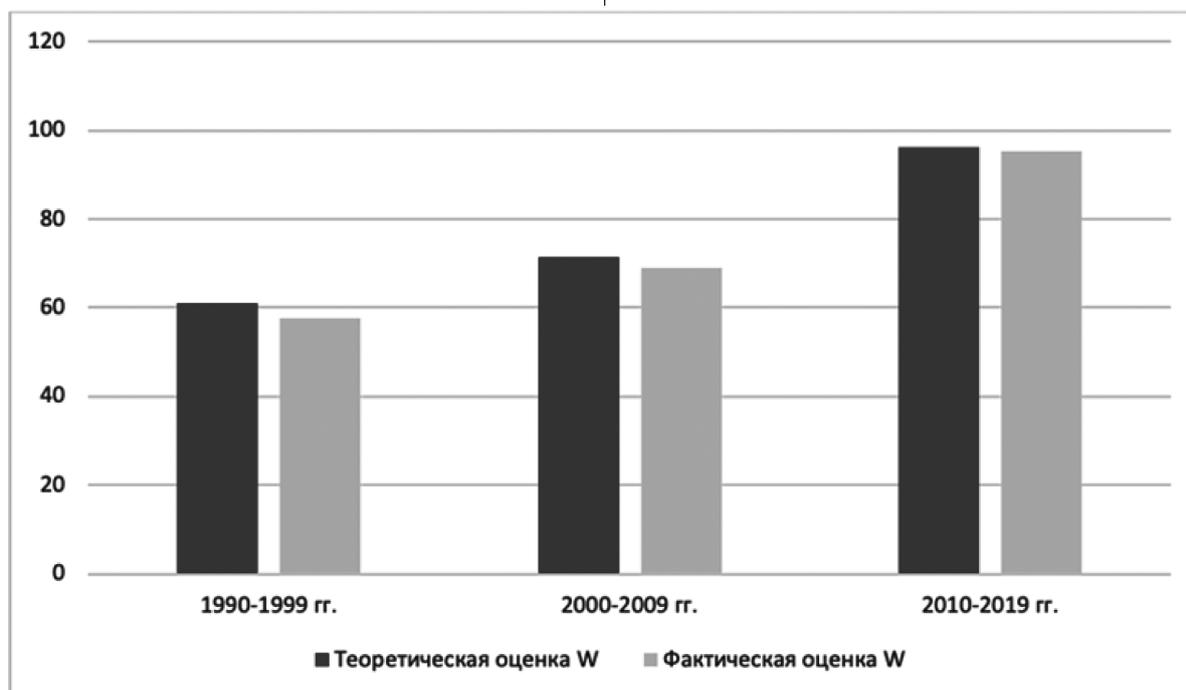


Рис. 2. Сравнение средних значений теоретических и фактических оценок автоматизированной системы по возрастным группам зданий

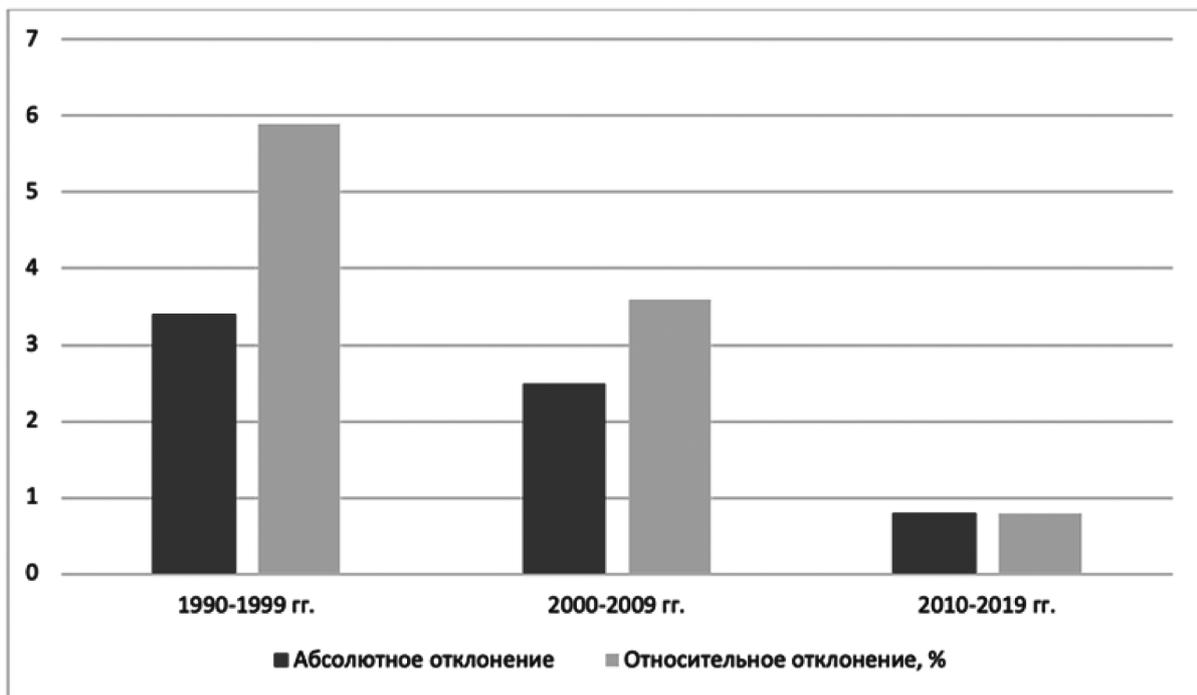


Рис. 3. Сравнение отклонений теоретических оценок автоматизированной системы от фактических по возрастным группам зданий

деформации несущих конструкций, температурно-влажностные сенсоры в подвалах и на чердаках, акселерометры для контроля вибраций от технологического оборудования, системы мониторинга протечек в инженерных системах, а также интеллектуальные счетчики всех видов ресурсов с функциями диагностики состояния сетей. Все датчики были интегрированы в единую сеть с использованием беспроводных технологий LoRaWAN, что обеспечило минимальные затраты на монтаж и высокую надежность передачи данных. Полученные результаты показали кардинальное улучшение точности оценки технического состояния: средняя погрешность системы составила менее 2 %, а максимальное отклонение не превысило 2,6 % даже для наиболее сложных случаев. Такая высокая точность достигается благодаря использованию актуальных данных мониторинга в реальном времени, что позволяет системе адаптироваться к фактическому состоянию здания и учитывать все значимые изменения в работе конструкций и инженерных систем.

Корреляционный анализ результатов мониторинга выявил сильные взаимосвязи между различными параметрами технического состояния зданий, что позволило оптимизировать алгоритмы работы автоматизированной системы и повысить надежность диагностики. Особенно тесная корреляция наблюдается между состоянием систем отопления и параметрами температурно-влажностного режима в помещениях (коэффициент корреляции 0,87), что позволяет системе диагностировать проблемы в теплоснабжении на ранней стадии их развития. Состояние кровельных конструкций показы-

вает высокую корреляцию с параметрами влажности в подкровельном пространстве (0,82), что обеспечивает своевременное выявление протечек и нарушений гидроизоляции. Интересные закономерности выявлены в корреляции между электрическими параметрами сетей и общим техническим состоянием здания: здания с более высокими показателями технического состояния демонстрируют более стабильные электрические характеристики, что объясняется комплексным подходом к техническому обслуживанию. Данные корреляционные зависимости были использованы для создания системы взаимного контроля показаний датчиков и повышения достоверности результатов мониторинга. В случае обнаружения аномальных значений одного из параметров система автоматически анализирует показания коррелированных датчиков для подтверждения или опровержения тревожной информации, что значительно снижает количество ложных срабатываний и повышает доверие операторов к автоматизированной системе.

Экономический эффект от внедрения автоматизированной системы управления техническим состоянием зданий оказался значительно выше первоначальных ожиданий, что подтверждает целесообразность инвестиций в цифровые технологии для сферы жилищно-коммунального хозяйства. Детальный анализ затрат на техническое обслуживание зданий, оборудованных автоматизированной системой, показал снижение эксплуатационных расходов на 18–25 % по сравнению с традиционными методами планового обслуживания.

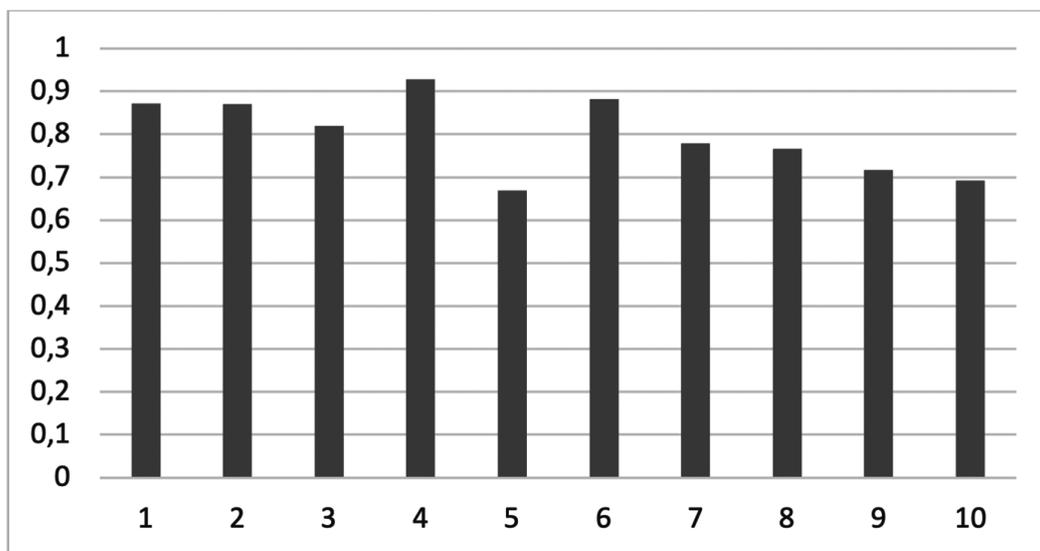


Рис. 4. Распределение значений корреляции для зданий с установленной АСУТП. По оси X представлены интервалы значений коэффициента корреляции, по оси Y — количество домов, попадающих в соответствующий интервал

Основная экономия достигается за счет перехода от планового к состоянию-ориентированному техническому обслуживанию, когда ремонтные работы проводятся не по расписанию, а при достижении параметрами технического состояния определенных пороговых значений. Такой подход позволяет избежать как преждевременной замены исправных элементов, так и аварийных ситуаций из-за внезапных отказов оборудования. Система предиктивного обслуживания, реализованная в автоматизированной системе, обеспечила сокращение времени простоя инженерных систем на 35–40 % благодаря заблаговременному планированию ремонтных работ и подготовке необходимых материалов и оборудования. Значительная экономия достигается также за счет оптимизации логистики технического обслуживания: система автоматически группирует ремонтные работы по территориальному принципу и совместимости выполняемых операций, что снижает транспортные расходы и повышает эффективность использования трудовых ресурсов. Внедрение автоматизированной системы позволило также существенно сократить штат административного персонала, занимающегося планированием и контролем технического обслуживания, при одновременном повышении качества выполняемых работ. Срок окупаемости инвестиций в автоматизированную систему для типового многоквартирного дома составляет 3,5–4,2 года, что является приемлемым показателем для данного класса технических решений.

Заключение

Проведенное исследование убедительно демонстрирует высокую эффективность и практическую зна-

чимось разработанной автоматизированной системы управления технологическими процессами для комплексной оценки технического состояния объектов капитального строительства. Созданная система успешно интегрирует современные цифровые технологии, включая Интернет вещей, предиктивную аналитику и концепцию цифрового двойника, в единый программно-технический комплекс, обеспечивающий качественно новый уровень управления техническим состоянием зданий. Математическая модель, лежащая в основе системы, показала высокую точность прогнозирования для зданий различных типов и возрастных групп, при этом наилучшие результаты достигаются для современных объектов, где погрешность не превышает 2–3 %. Экспериментальная проверка на реальных объектах с полным комплексом IoT-датчиков подтвердила способность системы обеспечивать непрерывный мониторинг технического состояния и своевременно выявлять потенциальные проблемы до их перехода в критическое состояние. Экономический эффект от внедрения системы составляет 18–25 % снижения эксплуатационных расходов при сроке окупаемости 3,5–4,2 года, что делает технологию привлекательной для широкого практического применения. Особую ценность представляет возможность перехода от планового к состоянию-ориентированному техническому обслуживанию, что не только снижает затраты, но и существенно повышает надежность и безопасность эксплуатации зданий. Разработанная система полностью соответствует требованиям действующих нормативных документов, включая новый ГОСТ 31937–2024, и создает технологическую основу для массового внедрения автоматизированных систем мониторинга в российской практике управления недвижимостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Study on Bridge Structural Health Monitoring System Based on BIM And GIS // Transactions on Engineering and Technology Research. 2024. Том. 4, С. 327–331. DOI: 10.62051/12375a41
2. Bodily P.M., Griffith I.D., Hofle M., Heidari O., Lama S., Conlin A., Christiansen A., Moore D., Wilson K., Sebastian A., Schoen M.P. Automating Predictive Maintenance for Energy Efficiency via Machine Learning, and IoT Sensors // Proceedings of ISCA 34th International Conference on Computer Applications in Industry and Engineering. 2021. № 79. С. 54–63. DOI: 10.5555/3456123.3456789
3. Construction digital twin: a taxonomy and analysis of the application areas // Automation in Construction. 2024. № 105451. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105451
4. Jahangir M.F., Schultz C.P.L., Kamari A. A review of drivers and barriers of Digital Twin adoption in building project development processes // Journal of Information Technology in Construction. 2024. Том. 29. С. 141–178. DOI: 10.36680/j.itcon.2024.008
5. Digital twins and BIM: a systematic literature review // Buildings. 2023. Digital twins and BIM: a systematic literature review // Buildings. 2023. Том. 13, № 2. DOI: 10.3390/buildings13020345
6. Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review // Sustainability. 2023. Том. 15, № 14. DOI: 10.3390/su151410908
7. Integrating AI in Structural Health Monitoring (SHM): A Systematic Review on Advances, Challenges, and Future Directions // SSRN. 2025.
8. Vuarnoz D., Hoxha E., Nembrini J., Jusselme T., Cozza S. Analyzing building energy performance uncertainty: An application to the design stage // Applied Energy. 2022. Том. 306. С. 118073. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.118073
9. Muhammet Yildirim, Omer Giran. Implementation of Digital Twins in construction industry: A systematic review // Journal of Construction Engineering, Management & Innovation. 2024. Том. 7, №. 3. С. 189–212. DOI: 10.31462/jcemi.2024.03189212
10. Obinna C. Madubuike, Chimay J. Anumba, Rana Khallaf. A review of digital twin applications in construction // Journal of Information Technology in Construction. 2022. Том. 27. С. 145–172.
11. Predictive Maintenance in Buildings; Ultimate Guide 2024 // Neuroject. 2024.
12. Есть ли спрос в России на BIM и цифровые двойники? // Содис Лаб. 2024. URL: <https://www.sodislab.com/ru/blog/bim-russia> (дата обращения: 10.08.2024).
13. Цифровизация в строительстве: как технологии меняют девелоперские проекты // Цифра Строй. 2024. URL: <https://cifrastroy.ru/posts/kak-tehnologii-bim-tim-i-tsifrovyye-dvojniki-menjajut-otrasl> (дата обращения: 12.08.2024).

© Парамонов Максим Юрьевич (Dozor97-19@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗМЕРЕНИЙ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИНДЕКСА МЕРЦАНИЙ

Плотников Артём Сергеевич

Аспирант, Иркутский государственный
университет путей сообщения
mywork98@mail.ru

AUTOMATED QUALITY ASSESSMENT OF RADIO NAVIGATION PARAMETER MEASUREMENTS BASED ON THE FLICKER INDEX ANALYSIS METHOD

A. Plotnikov

Summary. Automated quality assessment of radio navigation parameter measurements in navigation locomotive equipment is an important task to ensure the safety and efficiency of railway transportation. This paper proposes a method for evaluating signal quality based on the analysis of the flicker index, which allows for detecting and quantitatively characterizing interference and distortions in radio signals. The developed automatic data processing algorithm enables timely identification of deteriorating conditions of navigation signal reception, thereby enhancing the reliability of positioning systems in complex operational environments. Experimental studies confirmed the effectiveness of the proposed approach and established threshold values of the flicker index for various levels of measurement quality. The results demonstrate the prospects for implementing this method in railway navigation systems to improve their automation and reliability.

Keywords: radio navigation parameters, measurement quality, flicker index, automatic assessment, navigation equipment, signals, interference, interference effects, distortions, railway navigation, system reliability.

Аннотация. Автоматизированная оценка качества измерений радионавигационных параметров в навигационной локомотивной аппаратуре является важной задачей для обеспечения безопасности и эффективности железнодорожных перевозок. В статье предлагается методика оценки качества сигналов на основе анализа индекса мерцаний, который позволяет выявлять и количественно характеризовать помехи и искажения в радиосигналах. Разработанный алгоритм автоматической обработки данных позволяет своевременно определять ухудшение условий приема навигационных сигналов, что способствует повышению надежности систем позиционирования в сложных эксплуатационных условиях. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили эффективность предложенного подхода, а также определили пороговые значения индекса мерцаний для различных уровней качества измерений. Полученные результаты демонстрируют перспективы внедрения данного метода в системы железнодорожной навигации для повышения их автоматизации и надежности.

Ключевые слова: радионавигационные параметры, качество измерений, индекс мерцаний, автоматическая оценка, навигационная аппаратура, сигналы, помехи, интерференционные эффекты, искажения, железнодорожная навигация, надежность систем.

Введение

Современные железнодорожные навигационные системы требуют высокой точности и надежности определения положения локомотивов для обеспечения безопасного движения, повышения эффективности перевозочного процесса и оптимизации маршрутов. В условиях сложных эксплуатационных условий, таких как городские тоннели, мостовые сооружения и зоны с высоким уровнем радиопомех, качество радионавигационных измерений может значительно снижаться. В связи с этим возникает необходимость в разработке автоматизированных методов оценки качества получаемых данных для повышения надежности навигационных систем [1, с. 47].

Одним из перспективных подходов является использование анализа мерцаний радиосигналов нави-

гационных систем. Этот метод предполагает выявление и количественную оценку мерцаний в сигналах, которые могут свидетельствовать о наличии помех, искажений или ухудшении условий приема [4, с. 19]. В данной статье рассматривается разработка и внедрение автоматизированной системы оценки качества радионавигационных параметров в навигационной аппаратуре локомотива на основе анализа индекса мерцаний.

Актуальность темы

Современные железнодорожные системы используют разнообразные радионавигационные технологии, включая Глобальную навигационную спутниковую систему (ГНСС), радиомаяки, лидары и другие источники сигнала. Однако качество получаемых данных зачастую зависит от множества факторов: погодных условий, наличия радиопомех, технического состояния оборудо-

вания и особенностей окружающей среды [2, с. 570]. В связи с этим возникает необходимость в автоматизированных системах мониторинга и оценки точности измерений для обеспечения безопасного движения и своевременного реагирования на ухудшение условий приема сигналов.

Использование метода анализа индекса мерцаний позволяет выявлять признаки ухудшения качества сигнала на ранних стадиях [4, с. 14]. Такой подход обеспечивает возможность оперативного принятия решений о корректировке работы навигационных систем или переключении на резервные источники данных, что значительно повышает надежность и безопасность железнодорожных перевозок.

Мерцания характеризуются быстрыми колебаниями амплитуды или фазы радиосигнала, которые возникают под воздействием различных факторов, таких как электромагнитные помехи, интерференционные эффекты, многолучевое распространение сигнала или неисправности в оборудовании [3]. Эти быстрые изменения могут негативно влиять на качество навигационных данных и точность определения положения.

Индекс мерцаний служит для количественной оценки степени выраженности таких колебаний в сигнале. Он определяется как отношение площади под кривые отклонения сигнала от его среднего значения к общей площади сигнала за определённый временной промежуток, что позволяет объективно измерить уровень помех и нестабильности сигнала:

$$FI = \frac{\sum_{i=1}^N |A_i - \bar{A}|}{\sum_{i=1}^N A_i}$$

Где A_i — амплитуда сигнала в момент времени i , \bar{A} — средняя амплитуда за интервал, N — число отсчетов.

Высокий индекс мерцаний свидетельствует о наличии значительных колебаний сигнала и ухудшении его качества.

Методы анализа

Для автоматизированной оценки качества радиосигналов используются различные методы обработки данных, такие как анализ во временной области, спектральный анализ, статистические методы и подходы на базе машинного обучения [5, с. 37; 6, с. 50; 7, с. 80; 8, с. 2107]. В данной работе особое внимание уделяется исследованию временных характеристик сигнала, реализуемому через расчет индекса мерцаний и мониторинг его изменений в динамике.

Постановка задачи

Целью данного исследования является создание автоматизированной системы для оценки точности из-

мерений радионавигационных параметров в навигационной аппаратуре локомотива, основанной на анализе показателя мерцаний сигнала.

Задачи включают:

1. Разработка алгоритмической основы для вычисления индекса мерцаний в сигналах навигационного оборудования;
2. Создание программных решений для автоматизированного сбора, обработки и анализа данных;
3. Проведение экспериментальных исследований с целью установления пороговых значений индекса мерцаний при различных условиях эксплуатации;
4. Внедрение разработанной системы в существующие навигационные комплексы локомотивов для повышения их эффективности;
5. Оценка работоспособности и точности предложенного метода по критериям точности измерений и скорости реагирования системы на изменения условий.

Методика исследования

Для проведения тестирования разрабатываемой системы использовались исходные данные, полученные на реальных локомотивных маршрутах в разнообразных условиях эксплуатации: открытые пространства, тоннельные участки, городские районы с интенсивным электромагнитным фоном. Запись сигналов осуществлялась с помощью специализированного приемного оборудования, обладающего высокой временной точностью, что обеспечивало детальное фиксирование характеристик навигационных сигналов в различных условиях.

Обработка сигналов состоит из нескольких ключевых этапов:

1. Фильтрация — устранение высокочастотных шумов и помех, чтобы повысить качество исходных данных.
2. Разделение сигнала на временные интервалы — сегментирование на окна длительностью от 1 до 5 секунд для более точного анализа.
3. Определение среднего уровня — вычисление среднего значения сигнала в каждом интервале для установления базовой линии.
4. Расчет индекса мерцаний — по соответствующей формуле, позволяющей количественно оценить степень колебаний сигнала.
5. Анализ временной динамики — отслеживание изменений индекса мерцаний во времени для выявления тенденций и аномалий.

На основе собранных данных разрабатывается алгоритм, который выполняет следующие функции:

1. Определяет индекс мерцаний для каждого временного сегмента сигнала;

2. Сравнивает полученные показатели с заранее установленными пороговыми значениями, определенными в ходе экспериментальных исследований;
3. Формирует оценку текущего уровня качества измерений, классифицируя его как «отличное», «приемлемое» или «неудовлетворительное»;
4. Автоматически генерирует предупреждающие сообщения при превышении допустимых порогов, обеспечивая своевременное реагирование на возможные сбои или ухудшение условий работы системы.

Экспериментальное исследование

Для верификация предложенного метода контроля целостности измерений радионавигационных параметров представлен пример работы программы на искусственно созданных данных с аномальными погрешностями, чтобы наглядно показать, как данная программа обнаруживает аномальные погрешности на основе анализа индекса мерцаний.

На рисунке 1 представлен график сигнала с добавленными шумами и скачками. На котором по горизонтальной оси отложены временные эпохи, а по вертикальной оси уровень индекса мерцаний.

На данном графике отчетливо видно участок с выделяющимся уровнем индекса мерцаний в отношении всего графика.

На рисунке 2 представлен график обработанного сигнала без явных аномалий. Красные точки показывают места обнаруженных «аномальных» погрешностей по индексу мерцаний, которые не выходят за установленный уровень.

Этот пример показывает работу алгоритма: он анализирует окно за окном и выделяет те участки сигнала, где индекс мерцаний превышает заданный порог. При решении реальной задачи параметры «размер окна» и «предельное значение индекса мерцаний» нужно подбирать под поставленные задачи.

Внедрение системы

Созданный программный модуль подключается к навигационному оборудованию локомотива посредством соответствующих интерфейсов связи. В рамках системы реализованы возможности отображения в реальном времени текущего состояния и архивирования данных для последующего анализа и оценки эффективности работы системы.

Результаты экспериментальных исследований

Полевые испытания системы были проведены на железнодорожных участках с различной степенью сложности:

1. В условиях открытой местности значения индекса мерцаний оставались низкими (менее 0.2), что свидетельствовало о высоком качестве измерений и стабильной работе системы.

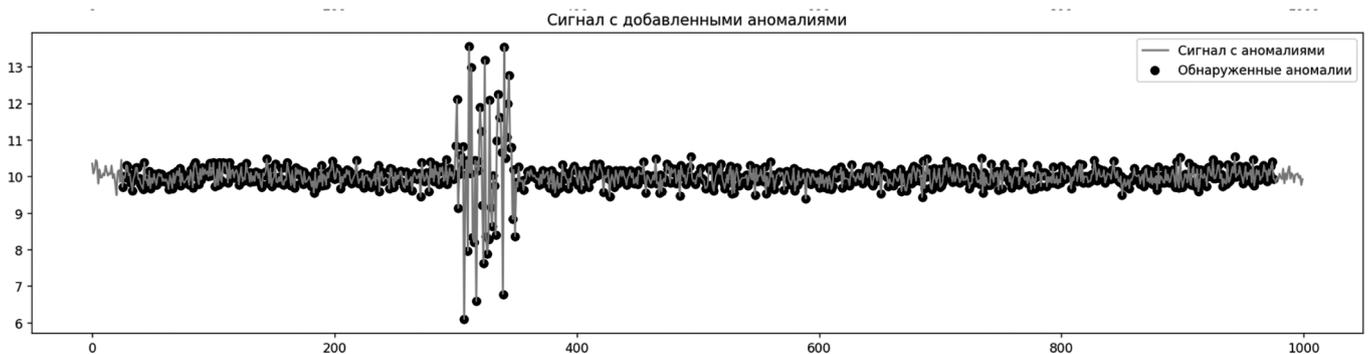


Рис. 1. Сгенерированный сигнал с добавлением аномальных погрешностей

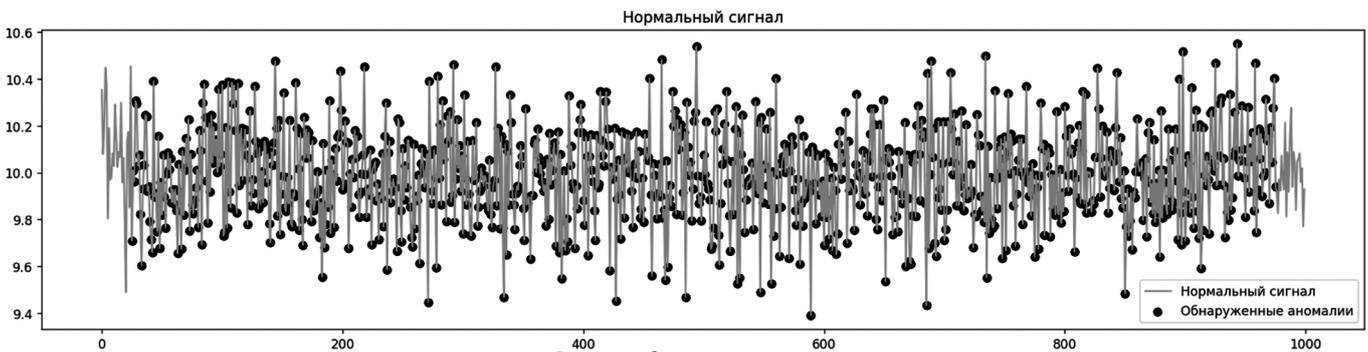


Рис. 2. Обработанный сигнал с исключенными аномальными погрешностями

2. В тоннельных участках индекс увеличивался до диапазона 0.5–0.7, указывая на присутствие помех и снижение качества сигнала.
3. В городских районах с высоким уровнем электромагнитных помех показатели достигали значений выше 0.8, что отражало существенное ухудшение условий приема навигационных сигналов и необходимость дополнительных мер по обеспечению надежности системы.

На основании экспериментальных данных были определены пороговые значения:

Таблица 1.

Зависимость индекса мерцания от точности позиционирования

Статус	Значение FI
Хорошее качество	$FI < 0.3$
Удовлетворительное	$0.3 \leq FI < 0.6$
Плохое качество	$FI \geq 0.6$

Автоматическая система успешно распознавала ухудшение условий приема и своевременно информировала оператора или переключала режим работы оборудования.

Внедренный метод продемонстрировал значительный прогресс в автоматизации мониторинга качества измерений радионавигационных параметров в условиях реальной эксплуатации локомотивов. Анализ индекса мерцаний подтвердил свою высокую чувствительность как к наличию помех, так и к ухудшению условий приема сигналов, что делает его ценным инструментом для своевременного выявления проблем и повышения надежности навигационных систем.

Преимущества данного метода заключаются в следующем:

1. Высокой чувствительности к различным типам помех и нестабильностям сигнала;
2. Способности обеспечивать оперативное реагирование благодаря автоматизированной обработке данных;
3. Простоте внедрения и низкой вычислительной нагрузке, что облегчает интеграцию в существующие системы;

4. Возможности беспрепятственного соединения с системами диспетчерского контроля для повышения эффективности управления.

Однако, у метода есть и некоторые ограничения: он требует точной настройки пороговых значений под конкретные условия эксплуатации, а также существует риск ложных срабатываний при кратковременных всплесках помех или шумов [7, с. 81]. Перспективы дальнейшего развития включают в себя следующие направления:

1. Внедрение методов машинного обучения для повышения точности оценки состояния сигнала и автоматизации анализа;
2. Интеграцию анализа индекса мерцаний с другими характеристиками сигналов, такими как спектральные параметры, для более комплексной оценки качества связи;
3. Создание адаптивных алгоритмов, способных эффективно работать в различных условиях эксплуатации и динамически подстраиваться под изменения окружающей среды;
4. Расширение функциональных возможностей системы за счет внедрения предиктивных моделей, позволяющих прогнозировать ухудшение качества сигнала и своевременно предпринимать меры по его восстановлению.

Заключение

Созданная система автоматизированной оценки качества измерений радионавигационных параметров, основанная на методе анализа индекса мерцаний, продемонстрировала свою эффективность в условиях реальной эксплуатации локомотивов. Она обеспечивает своевременное обнаружение ухудшений условий приема сигналов, что способствует повышению уровня безопасности и надежности железнодорожных перевозок.

Применение данного подхода способствует развитию интеллектуальных систем управления движением поездов и может быть интегрировано в современные комплексы железнодорожной автоматики и телемеханики, расширяя возможности автоматизации и повышения эффективности железнодорожного транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барановский В.К., Михайлов А.Н. Диагностика помех в системах спутниковой навигации // Электроника и вычислительная техника. — 2016. — №6. — С. 44–50.
2. Chen L., Zhao Q., Li Y. Evaluation of signal integrity in railway navigation systems // Journal of Railway Science and Engineering. — 2019. — Vol. 16. — Issue 4. — pp. 567–574.
3. European Space Agency (ESA). GNSS Signal Quality Monitoring Techniques and Standards // ESA Technical Report TR-ESA-GNSS-QC-2020-01.-2020.
4. Федоров А.С., Иванова Е.В., Сидоров В.П. Современные методы обработки навигационных сигналов // Радиотехника и электроника: научный журнал. — 2022. — №1. — С. 12–20.
5. Григорьев А., Петрова Н. Методы автоматической оценки надежности навигационных сигналов // Наука и техника транспорта и связи. — 2017. — № 2. — С. 33–40.
6. Иванов А.П., Смирнова Е.В. Методы оценки качества радионавигационных сигналов // Журнал прикладной навигации и геодезии. — 2020. — № 3. — С. 45–52.
7. Кузнецов В.А., Лебедев И.В. Анализ помех в навигационных системах железных дорог // Транспортная электроника и системы управления. — 2019. — № 4. — С. 78–85.
8. Lee S., Kim J., Park D. Flicker analysis for interference detection in GNSS signals // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 2020. — Vol. 56, No. 3, pp. 2100–2108.
9. Petrov V., Johnson M. Signal quality assessment in GNSS systems // International Journal of Navigation and Observation. — 2018. — Vol. 2018, Article ID 123456.
10. Zhang Y., Liu H., Wang X. Flicker index-based signal quality monitoring for GNSS receivers // Sensors. — 2021. — Vol. 21, No. 5, p. 1502.

© Плотников Артём Сергеевич (mywork98@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ И УЧЕТА ДЛЯ ЗАЛОГОВОЙ КОММЕРЧЕСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

MODELS OF MANAGEMENT AND ACCOUNTING PROCESSES FOR A PAWNSHOP COMMERCIAL ORGANIZATION

**O. Romashkova
T. Ermakova**

Summary. The purpose of the study is to improve the efficiency of organizational management and accounting in a collateral commercial organization by developing a functional model of a information system that allows for the automation of work with collateral jewelry in a pawnshop, using the capabilities of process modeling tools and UML and BPMN 2.0 standards. The study resulted in the development of functional diagrams for managing the accounting of collateral jewelry.

Keywords: pawnshop commercial organization, process diagram, case diagram, functional model, information system.

Ромашкова Оксана Николаевна

Доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Российская академия народного хозяйства
и государственной службы при Президенте РФ»,
г. Москва
ox-rom@yandex.ru

Ермакова Татьяна Николаевна

Кандидат технических наук, доцент ГАОУ ВО
«Московский городской педагогический университет»
ermaktat@bk.ru

Аннотация. Цель исследования заключается в повышении эффективности организационного управления и учета в залоговой коммерческой организации средствами разработки функциональной модели программного решения, позволяющего автоматизировать работу с залоговыми ювелирными изделиями в ломбарде, с использованием возможностей инструментария моделирования процессов и стандартов UML и BPMN 2.0. Результатом проведенного исследования являются разработанные схемы функционирования процессов управления учетом сданных в залог ювелирных изделий.

Ключевые слова: залоговая коммерческая организация, схема процесса, диаграмма прецедентов, функциональная модель, информационная система.

Введение

В ходе разработки модели функционирования информационной системы (ИС) для управления учетом сданных в залог ювелирных изделий в коммерческую организацию (ломбард) использован графический язык UML для создания диаграммы прецедентов и инструментальное средство Bizagi Modeler, позволяющее разработать схемы процессов для каждого прецедента с использованием стандарта BPMN 2.0 [1, 2].

В соответствии с указанными стандартами функциональная модель программного решения рассматривается в виде комплекса диаграмм прецедентов процессов и описывающих их схем [3].

Анализ информационных потоков, связанных с учетом сданных в залог ювелирных изделий

Залоговая коммерческая организация Ломбард предоставляет денежные займы физическим лицам, принимая в залог ювелирные изделия под определённый процент пользования займом и на оговоренный срок. Организационная структура залоговой коммерческой организации изображена на рисунке 1. Залоговая коммерческая организация Ломбард входит в состав Региональной ассоциации ломбардов (РАС).

Во главе организации стоит Директор.

Деятельность подразделения займов специальной коммерческой организации Ломбард в себя следующие информационные потоки, представленная на рисунке 2.

Основная деятельность в подразделении выполняет кассиром и администратором.

Кассир на основании внутренних документов по условиям займа и полученных данных от заемщика, в том числе о залоговом изделии (ЗИ), формирует заем, в процессе запрашивая оценку залогового изделия у оценщика.

После этого вся информация о займах, залоговых изделиях и заемщиках передается администратору, который в свою очередь формирует итоговую отчетность о деятельности ломбарда за определенный период и предоставляет её директору. При возникновении каких-либо ошибок учета, которые были выявлены при формировании итоговой отчетности, администратор должен обратиться ко внутреннему аудитору организации, который в свою очередь изучает данные и проводит расследование по поиску источника и исправлению ошибки учета.

Одним из видов итоговых отчетов о деятельности ломбарда является отчет о движении денежных средств

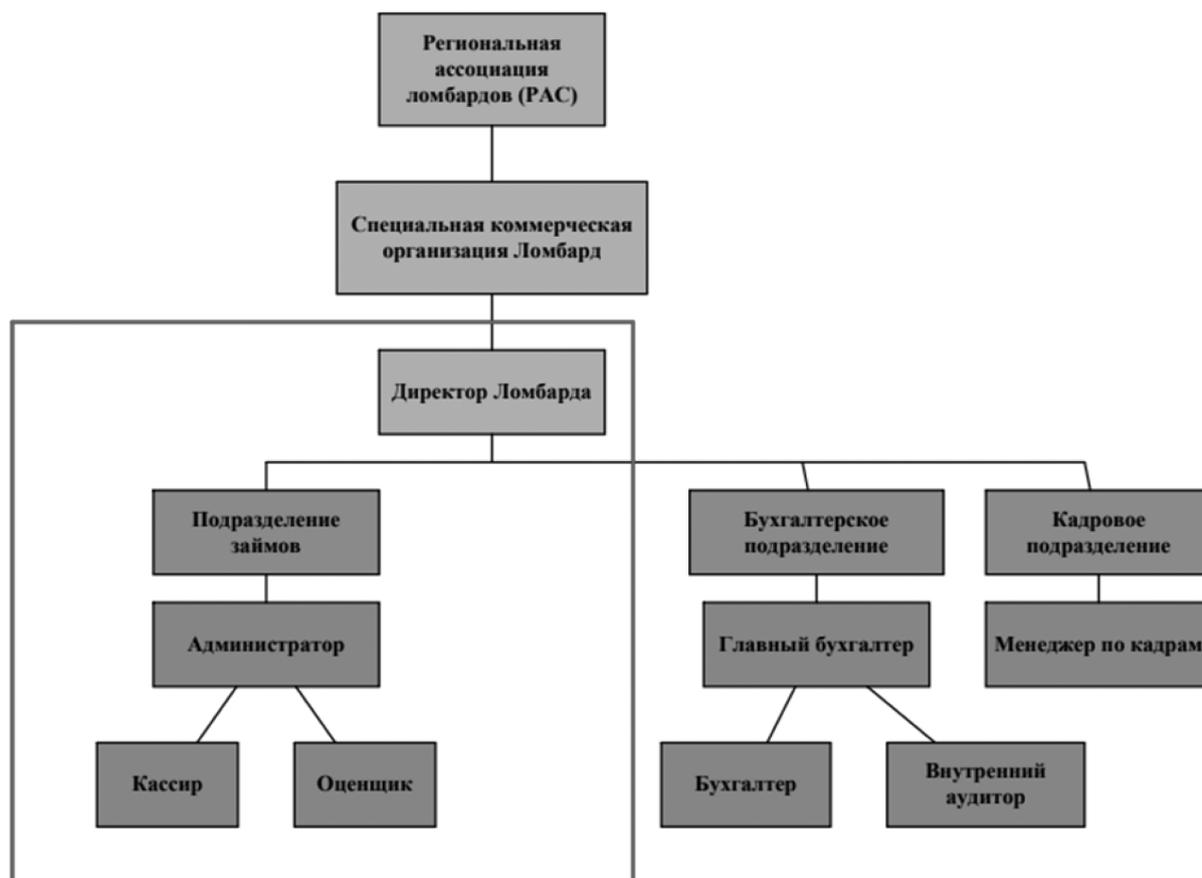


Рис. 1. Организационная структура залоговой коммерческой организации Ломбард

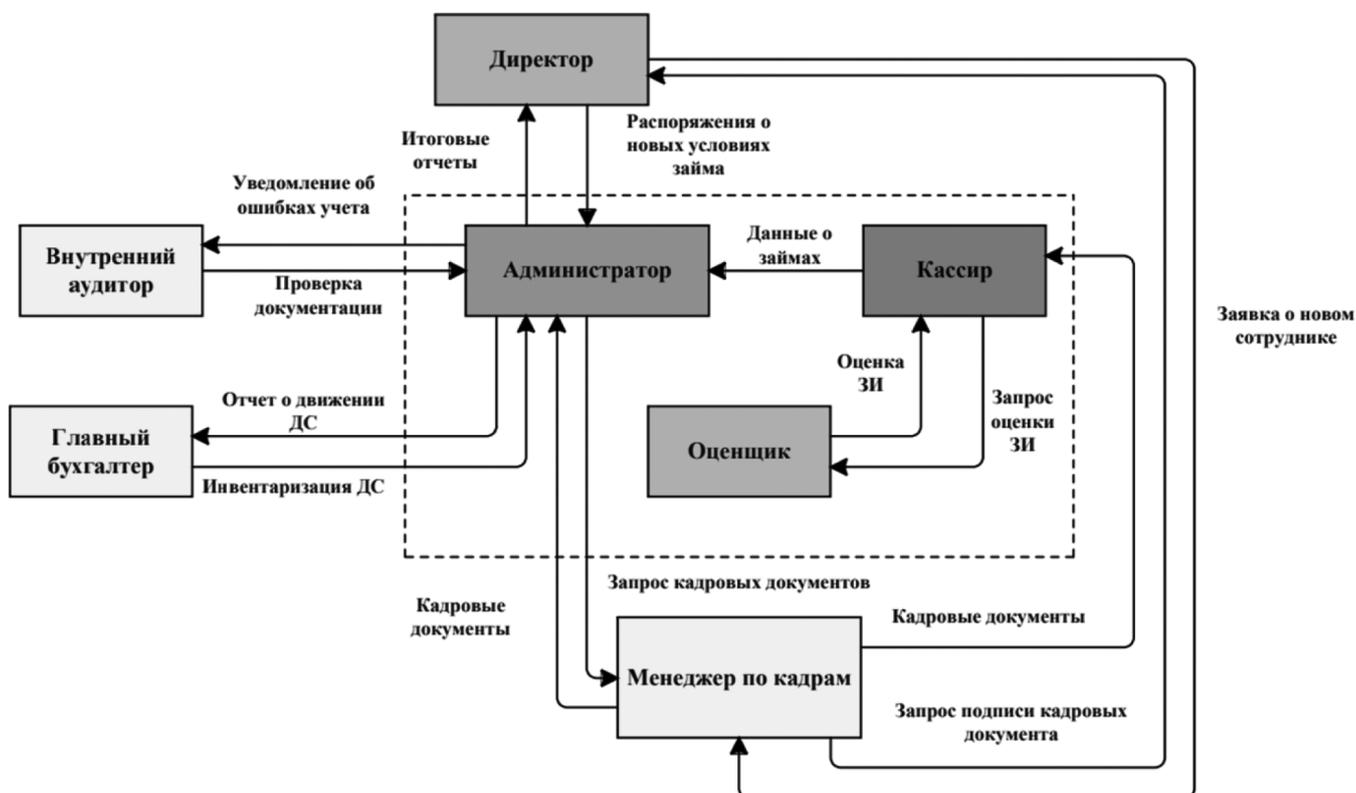


Рис. 2. Схема существующих информационных потоков в специальной коммерческой организации Ломбард

(ДС), который администратор направляет главному бухгалтеру залоговой коммерческой организации. Вся итоговая отчетность, которая подготавливается на основании данных о залогах, залоговых изделиях и заемщиках, имеет высокую значимость для разработки новых направлений развития организации и повышения прибыли. Менеджер по кадрам также взаимодействует с подразделением займов в лице администратора и кассира.

Разработка требований к информационной системе

В целях автоматизации процессов залоговой коммерческой организации, связанных с управлением проведением займов, необходимо разработать требования к информационной системе для поддержки организационной деятельности ломбарда [4].

Были сформированы функциональные требования к разрабатываемому решению:

1. Ввод, передача и прием информации о персональных данных заемщиков, данных о залоговых ювелирных изделиях;
2. Ведение базы данных с виртуальными карточками заемщиков и залогового имущества;

3. Автоматизированное заполнение залогового билета и договора займа;
4. Формирование макетов печатных форм залогового билета и договора займа;
5. Формирование отчетности о выданных займах и принятых в залог ювелирных изделий.

Результаты разработки модели функционирования информационной системы для залоговой коммерческой организации

Схема прецедентов ИС для учета сданных в залог ювелирных изделий представлена на рисунке 3.

На схеме показаны пять участников процесса функционирования: Администратор ИС, Директор, Кассир, Оценщик и Заемщик.

Схема процесса проверки возможности выдачи займа представлена на рисунке 4.

Действующими лицами в процессе «Проверка возможности выдачи займа» являются Кассир и Заемщик. После входа в систему кассир вводит данные, которые ему предоставил заемщик. В ИС осуществляется про-

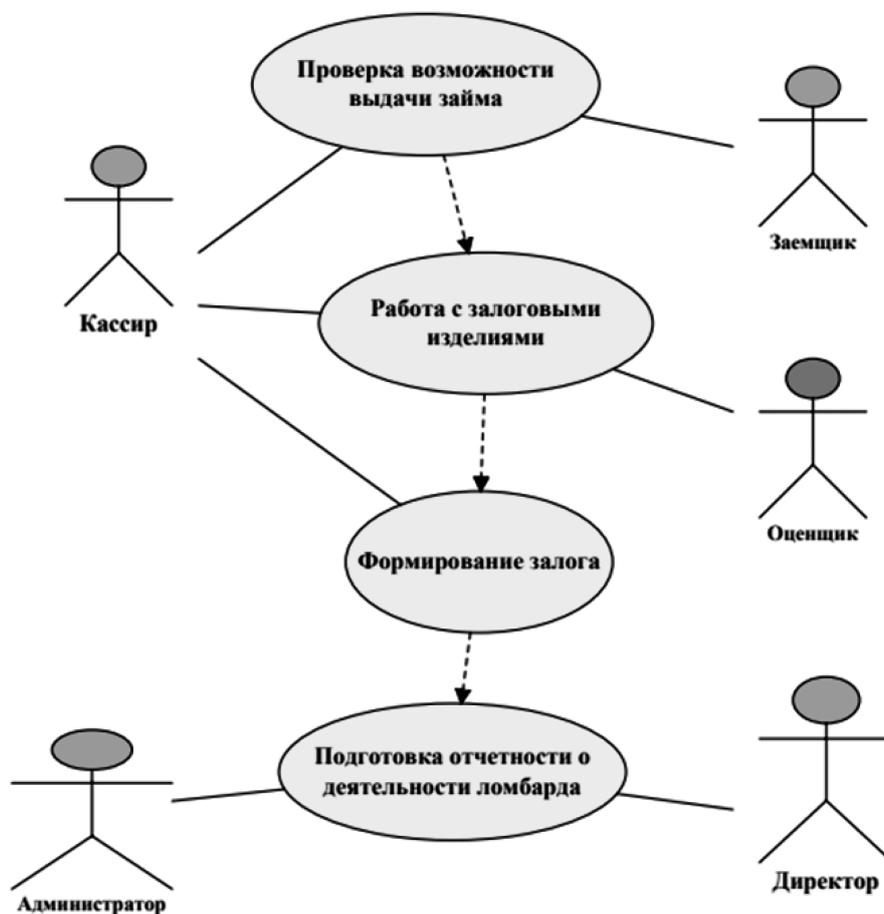


Рис. 3. Схема прецедентов ИС для учета сданных в залог ювелирных изделий

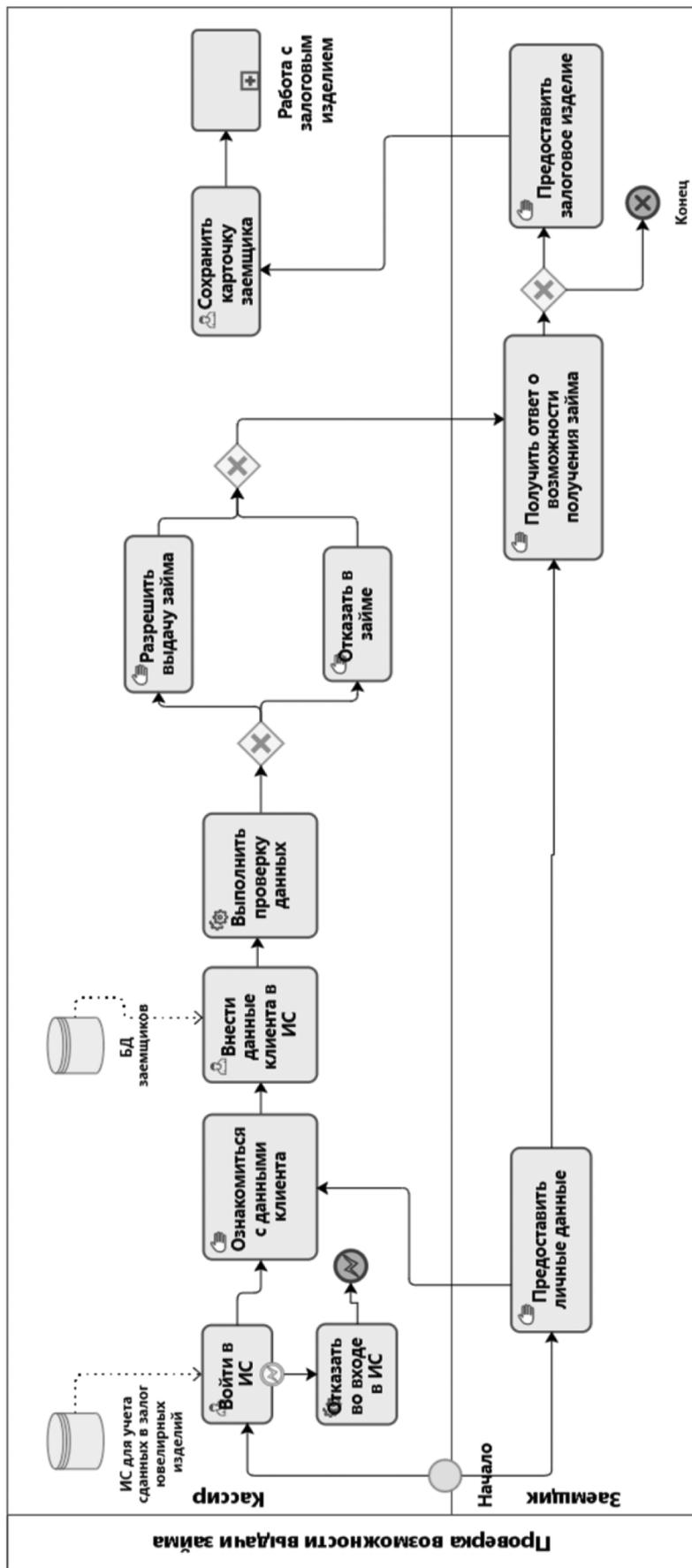


Рис. 4. Схема процесса проверки возможности выдачи займа

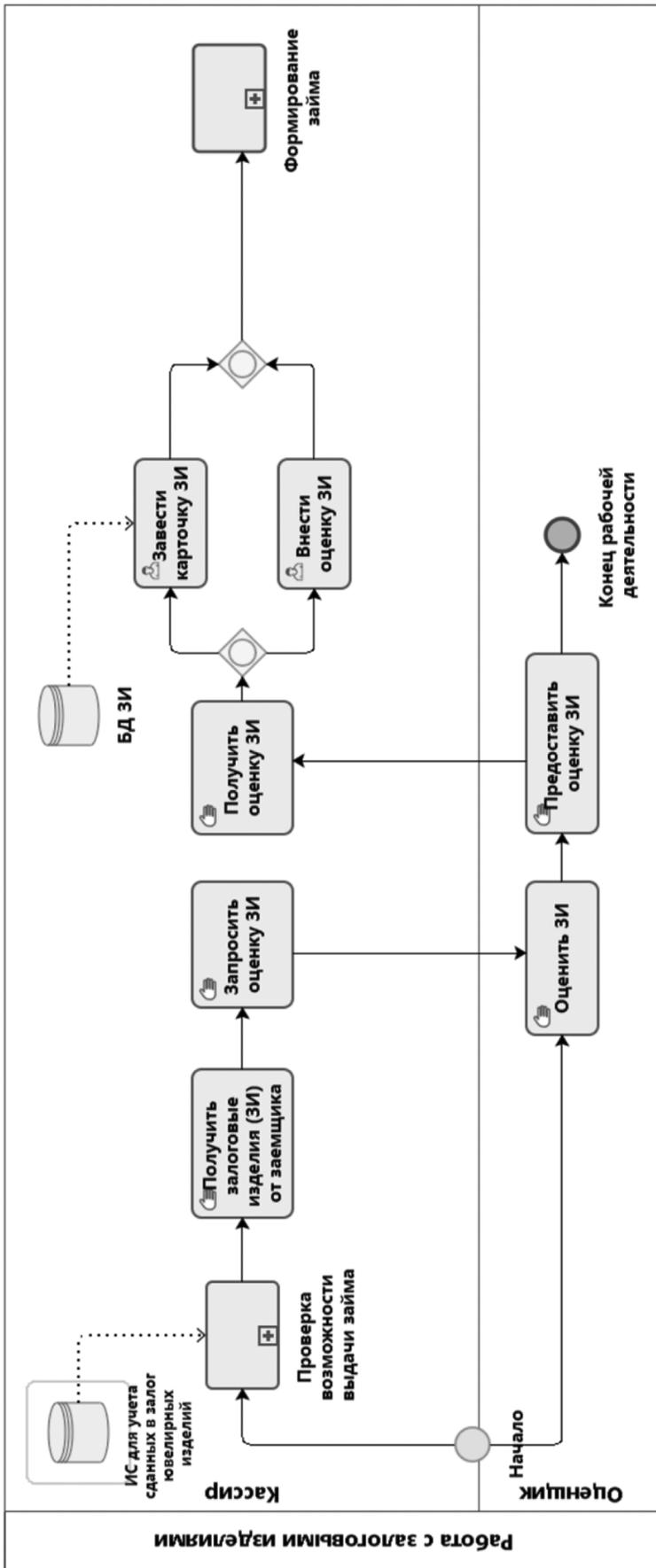


Рис. 5. Диаграмма процесса работы с залоговым изделием

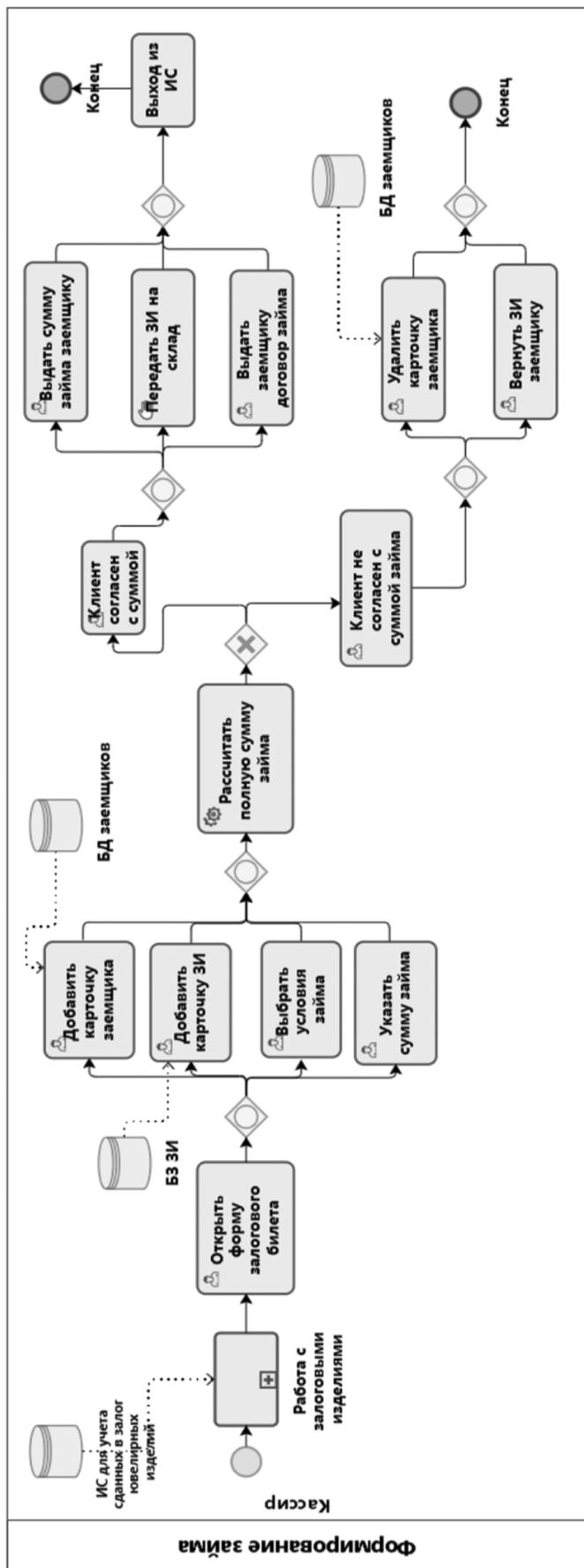


Рис. 6. Схема процесса формирования займа

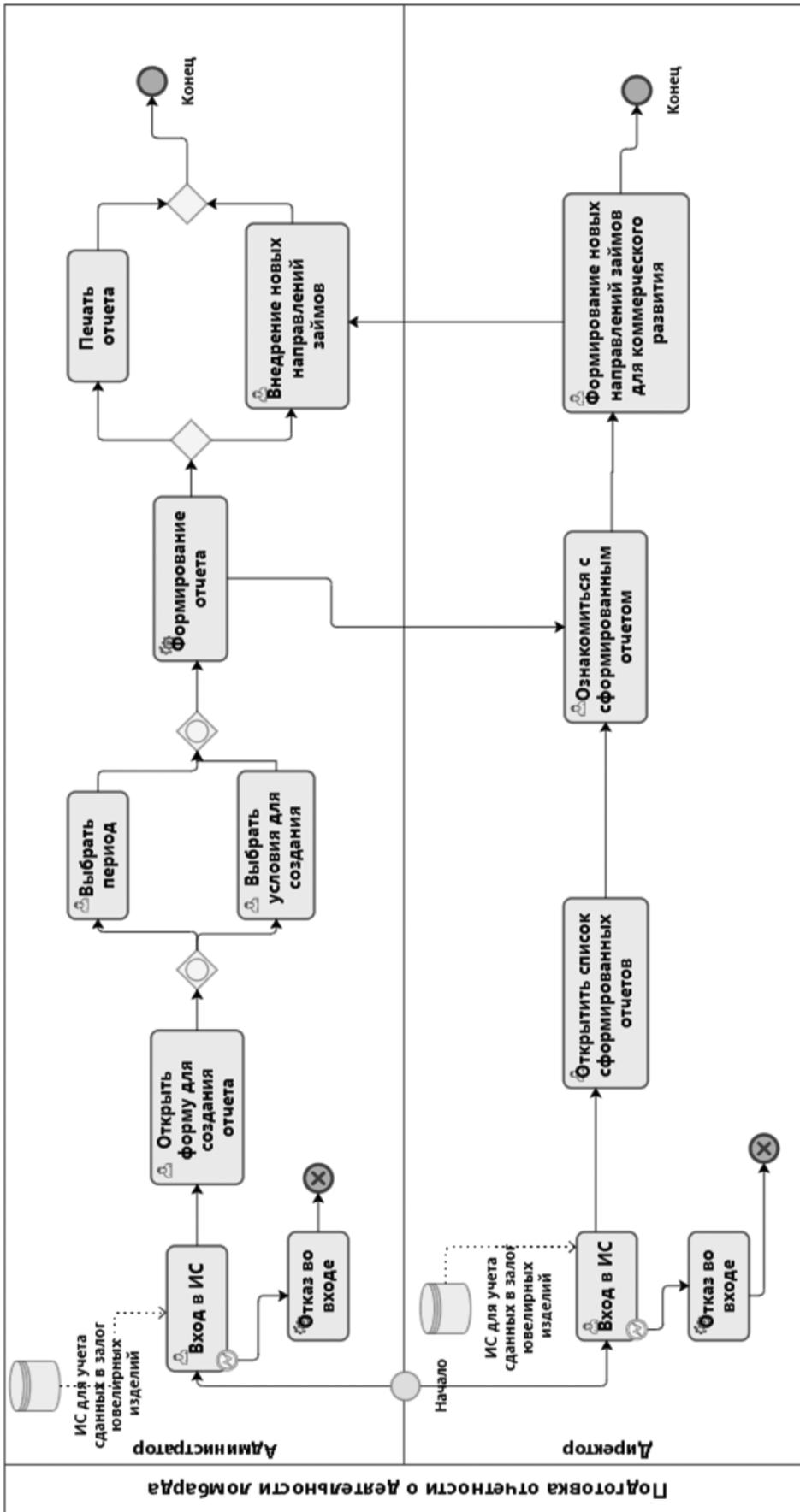


Рис. 7. Диаграмма процесса подготовки отчетности о деятельности ломбарда

верка этих данных на основании разрешений, установленных программой. Далее кассир сообщает заемщику о возможности предоставления ему займа, после чего заемщик принимает окончательное решение. При положительном решении заемщик предоставляет залоговое изделие кассиру.

На следующем этапе происходит детализация процесса работы с залоговым изделием, представленная на рисунке 5.

Поскольку кассир уже осуществляет работу в ИС, то повторный вход выполнять не требуется. Приняв залоговое изделие у заемщика, он просит оценщика предоставить результаты оценки для формирования суммы займа. После получения оценки вся информация о залоговом изделии вносится в карточку, формируемую в ИС для учета сданных в залог ювелирных изделий. Деятельность оценщика на данном этапе заканчивается до возникновения необходимости оценки нового залогового изделия. Таким образом, карточка залогового изделия готова для внесения в залоговый билет заемщика.

Схема, описывающая процесс формирования займа, представлена на рисунке 6.

Открыв форму для создания залогового билета, кассир вносит все данные о заемщике, условиях займа, добавляет карточку изделия и прописывает сумму займа. Итоговая сумма займа рассчитывается в ИС на следующих основаниях: процент начисления, указанного в условиях займа, срок займа и установленная кассиром сумма займа. Кассир должен сообщить заемщику все контрольные денежные значения для окончательного утверждения создания займа. В случае отказа заемщика по какой-либо причине сотрудник должен удалить карточку заемщика из ИС для учета сданных в залог ювелирных изделий и вернуть ему залоговое изделие.

В случае согласия заемщика со всеми условиями кассир выдает ему сумму займа, формирует подтверждающие документы по займу и передает залоговое изделие на склад специальной коммерческой организации Лом-

бард. На данном этапе процесс формирования займа завершается.

Схема описания процесса формирования отчетных документов о работе ломбарда представлена на рисунке 7. Действующими лицами являются Директор залоговой коммерческой организации Ломбард и Администратор ИС для учета сданных в залог ювелирных изделий.

Выполнение процесса формирования отчетности о деятельности ломбарда начинается со входа в ИС администратора и директора. В случае отказа во входе процесс завершается.

Администратор открывает форму для создания отчета, где выбирает все необходимые параметры, в том числе период для формирования отчета. После формирования отчета данный документ предоставляется директору. Директор в свою очередь знакомится с результатами и формирует новые направления для увеличения коммерческой прибыли организации. Администратор после формирования отчета либо печатает его для добавления в отчетную книгу, либо получив новые направления от директора, внедряет их в работу.

Заключение

Таким образом, был произведен анализ процессов работы с залоговыми ювелирными изделиями в коммерческой организации Ломбард и разработаны диаграммы процессов, составляющие функциональную модель [5, 6], положенную в основу проектирования и разработки информационной системы на базе платформы 1С: Предприятие [7].

Разработка информационной системы, автоматизирующей деятельность залоговой коммерческой организации ломбарда [8], позволит повысить эффективность процессов деятельности сотрудников организации по предоставлению займов клиентам, а также усовершенствовать процессы управления дальнейшей работой с ювелирными изделиями, их реализацией и подготовкой отчетности для контролирующих органов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермакова Т.Н., Овсянникова А.А. Анализ требований к информационной системе для учета сданных в залог ювелирных изделий // В сборнике: Открытая наука 2024. Сборник статей III Всероссийской научной конференции с международным участием. Москва, 2024. С. 201–203.
2. Петрова А.М., Ромашкова О.Н., Ермакова Т.Н., Чискидов С.В. Модели процессов функционирования информационной системы мониторинга климата и окружающей среды в арктическом регионе // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 4–2. С. 104–110.
3. Наумов М.А., Михалёва Т.Н., Чискидов С.В. Функциональные модели процессов управления корпоративными вычислительными ресурсами образовательной организации // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2023. № 2. С. 131–139.
4. Туманова А.М., Ромашкова О.Н., Михалёва Т.Н., Чискидов С.В. Функциональные модели программной системы наблюдения за показателями климата и окружающей среды в арктическом регионе // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2023. № 3. С. 120–125.

5. Новикова А.С., Ромашкова О.Н. Интеграция нейросетей в информационные системы розничных торговых сетей: прогнозирование и управление распределением ресурсов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2024. № 1–2. С. 49–52.
6. Ломовцев Р.С., Ромашкова О.Н., Пономарева Л.А. Алгоритм интеллектуальной поддержки управленческих решений для региональной образовательной системы // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 10 (71). С. 35–43.
7. Павличева Е.Н., Ромашкова О.Н. Информационные процессы поддержки принятия решений в многоуровневых образовательных системах /Москва, 2022.
8. Ponomareva L.A., Romashkova O.N. Training of specialists in on-board communication systems // В сборнике: 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications. 2020. С. 9078594.

© Ромашкова Оксана Николаевна (ox-rom@yandex.ru); Ермакова Татьяна Николаевна (ermaktat@bk.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В НАНОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

MODERN METHODS OF MATHEMATICAL MODELING IN NANOMATERIALS SCIENCE

D. Silantev

Summary. The article presents an overview of modern mathematical modeling methods in the field of nanomaterials and quantum systems. Key approaches are examined, including the solution of the Schrödinger equation for electronic structure analysis, quantum chemistry methods (Hartree–Fock, OVGf), molecular dynamics with embedded-atom potentials (EAM), finite element modeling of nonstationary thermal processes, and stochastic methods for describing mechanical effects. Special attention is paid to modeling heterogeneous systems such as mesoporous materials, doped nanocrystals, and two-dimensional metal–silicon structures. It is shown that combining various methods allows for a balance between calculation accuracy and computational efficiency. The research results demonstrate the importance of mathematical modeling for predicting material properties and optimizing technological processes.

Keywords: Schrödinger equation, quantum chemical calculations, molecular dynamics, finite element method, nanomaterials, mesoporous structures, doped nanocrystals, density functional theory (DFT), electronic structure, phase transitions, stochastic modeling, thermal processes, mechanical properties, computational efficiency.

Силантьев Данила Михайлович

Аспирант, Московский государственный
технологический университет «Станкин»
silad.micher@mail.ru

Аннотация. В статье представлен обзор современных методов математического моделирования в области наноматериалов и квантовых систем. Рассмотрены ключевые подходы, включая решение уравнения Шрёдингера для анализа электронной структуры, методы квантовой химии (Хартри-Фок, OVGf), молекулярную динамику с потенциалами погружённого атома (EAM), конечно-элементное моделирование нестационарных тепловых процессов и стохастические методы для описания механических воздействий. Особое внимание уделено моделированию гетерогенных систем, таких как мезопористые материалы, легированные нанокристаллы и двумерные металл-кремниевые структуры. Показано, что комбинирование различных методов позволяет достичь баланса между точностью расчётов и вычислительной эффективностью. Результаты исследований демонстрируют важность математического моделирования для прогнозирования свойств материалов и оптимизации технологических процессов.

Ключевые слова: уравнение Шрёдингера, квантово-химические расчёты, молекулярная динамика, метод конечных элементов, наноматериалы, мезопористые структуры, легированные нанокристаллы, теория функционала плотности (DFT), электронная структура, фазовые переходы, стохастическое моделирование, тепловые процессы, механические свойства, вычислительная эффективность.

Введение

Современные исследования в области наноматериалов и квантовых систем требуют комплексного применения математических методов для моделирования многоуровневых физических процессов. Фундаментальную роль играет уравнение Шрёдингера, позволяющее анализировать электронную структуру наноразмерных объектов. Для более сложных систем используются комбинированные подходы, включающие методы квантовой химии, молекулярной динамики и конечно-элементного моделирования.

Особое значение имеют специализированные методы расчета для гетерогенных систем, таких как мезопористые материалы и процессы механического воздействия на вещества. Эти подходы демонстрируют важность адаптации математического аппарата к специфике исследуемых явлений. Общей чертой современных исследований является поиск оптимального баланса между точностью расчетов и вычислительной эффективностью, что достигается за счет разумных упрощений и комбинирования различных методик.

Представленный обзор охватывает ключевые аспекты математического моделирования в материаловедении, подчеркивая взаимосвязь между теоретическими методами и их практическим применением для решения актуальных научных задач.

Обзорная часть

В ряде исследований [8; 7; 3; 6] в моделировании используется уравнение Шрёдингера.

Уравнение Шрёдингера — фундаментальное уравнение квантовой механики, описывающее эволюцию волновой функции системы во времени. В своей наиболее общей форме оно записывается как:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(r, t) = \hat{H} \Psi(r, t),$$

где: $\Psi(r, t)$ — волновая функция, характеризующая состояние системы,

\hat{H} — гамильтониан (оператор полной энергии системы),

\hbar — приведённая постоянная Планка,
 i — мнимая единица.

Для нерелятивистской частицы в потенциальном поле $V(r,t)$ уравнение принимает вид:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(r,t) = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r,t) \right) \Psi(r,t),$$

где m — масса частицы, а ∇^2 — оператор Лапласа.

Уравнение Шрёдингера лежит в основе квантовой динамики, позволяя предсказывать вероятностные распределения координат, импульсов и других наблюдаемых величин. В стационарном случае оно сводится к задаче на собственные значения, определяющей энергетический спектр системы.

Другая работа [4] посвящена исследованию электронных свойств нанокристаллов GaAs, легированных Zn, которое опирается на многоэлектронные методы квантовой химии, адаптированные для низкоразмерных систем. Основу методологии составило решение уравнения Шрёдингера в приближении самосогласованного поля, где волновая функция системы аппроксимируется антисимметризованными одноэлектронными орбиталями. Для учёта кулоновского и обменного взаимодействий между электронами применён метод Хартри-Фока, в котором потенциал каждого электрона вычисляется как усреднённое поле, создаваемое остальными частицами. Итерационная процедура самосогласования, реализованная в программе Gaussian, позволила минимизировать полную энергию системы путём последовательного уточнения электронных распределений. Использование базисных наборов 6-311g и ub3лур обеспечило компромисс между точностью расчётов и вычислительными ресурсами.

Анализ электронных свойств выполнен с помощью метода OVGf (outer valence Green function), основанного на теории функций Грина. Этот подход учитывает корреляции за пределами приближения Хартри-Фока через решение уравнения Дайсона-Швингера, связывающего невозмущённую и возмущённую функции Грина. Метод OVGf предоставил доступ к энергиям высшей занятой (HOMO) и низшей свободной (LUMO) молекулярных орбиталей, что критично для определения ширины запрещённой зоны. Расчёты показали, что даже для минимальных нанокристаллов (9 атомов) квантово-размерные эффекты доминируют, увеличивая запрещённую зону до 4.24 эВ.

Оптимизация геометрии нанокристаллов проводилась через минимизацию функционала полной энергии, где гамильтониан системы включал кинетические, потенциальные и обменные члены. Визуализация структуры выявила, что увеличение концентрации Zn выше

20 % приводит к ослаблению связи примеси с решёткой, что согласуется с ростом энергии системы при нарушении равновесной конфигурации. Зависимость ширины запрещённой зоны от размера НК интерпретирована в рамках модели квантового ограничения, где уменьшение числа атомов усиливает локализацию электронов.

Нелинейный рост запрещённой зоны при высоком легировании Zn (до 5.56 эВ) объяснён переходом от точечных примесных центров к формированию кластеров, что потребовало перехода от одночастичных моделей к учёту коллективных эффектов. Теория возмущений использована для оценки вклада акцепторных уровней Zn в электронную структуру, где потенциал примеси модифицирует зонный спектр через гибридизацию атомных орбиталей.

В следующем случае [10] использовался метод «погруженного атома», в котором энергия одного атома в атомной структуре определяется выражением:

$$E_i = F(\rho_i) + \frac{1}{2} \sum_i \phi_i,$$

$$\rho_i = \sum_j \rho_j,$$

где F — функция «погружения»; ρ_i — плотность электронов в i -м месте; ϕ — энергия парного взаимодействия.

В работе проведено молекулярно-динамическое (МД) моделирование сферических наночастиц серебра с гранецентрированной кубической решёткой, использующее различные EAM-потенциалы. Система термостатировалась ансамблем NVT (термостат Нозе-Гувера) с временным шагом 1 фс. На первом этапе выполнялось уравнивание при 300 К в течение 500 пс, затем нагрев до 1600 К со скоростью 2,6 К/пс для анализа структурных изменений. Температурные зависимости потенциальной энергии обработаны методом LOESS в программе Origin, что позволило сгладить данные и выявить закономерности фазовых переходов.

В следующей работе [9] основу исследования составило конечно-элементное моделирование нестационарного теплового поля, генерируемого высококонцентрированной плазменной струей. Математическая модель базировалась на решении нелинейного уравнения теплопроводности, учитывающего зависимость тепловых свойств материала от температуры. Для описания композиционной природы твердых сплавов (карбидная фаза + связка) введено понятие эквивалентной теплопроводности, рассчитываемой как средневзвешенное значение по объёмным долям компонентов.

Граничные условия включали конвективный теплообмен с окружающей средой и радиационные потери, что потребовало решения сопряженной задачи тепло-

переноса. Численная реализация выполнена в пакете MSC. Nastran с использованием восьмиузловых изопараметрических элементов. Дискретизация геометрии резца проводилась с адаптацией сетки к зоне режущей кромки, где локализовано тепловое воздействие.

Ключевой особенностью модели стало воспроизведение движения плазменного источника вдоль поверхности инструмента. Тепловая нагрузка задавалась распределенным потоком с гауссовым профилем плотности, перемещающимся с технологической скоростью. Анализ термического цикла включал расчет мгновенных скоростей нагрева и охлаждения, определяющих фазовые превращения в материале.

Валидация модели подтверждена сопоставлением расчетных температурных полей с экспериментальными данными. Установлено, что формирование нанокристаллической структуры (размер карбидов ~100 нм) происходит при достижении пиковых температур выше 1370°C и скоростях охлаждения, превышающих 10⁶ °C/с. На основе модели оптимизированы режимы обработки: сила тока дуги 315–400 А, скорость перемещения плазмотрона 18–23 м/ч.

Другое исследование [1] посвящено процессу эксфолиации графита в стержневой мельнице. Авторы обнаружили, что между стержнями и барабаном образуется динамический зазор из частиц, уменьшающийся в ходе обработки. Предложен новый механизм расслоения: при прохождении через зазор частица разделяется на две — толщиной, равной зазору, и с остаточной толщиной.

Для моделирования использован подход на основе марковских процессов с дискретными фракциями частиц. Это существенно упростило расчеты по сравнению с непрерывными моделями. Численные эксперименты выявили оптимальные параметры: зазор около половины максимальной толщины частиц и использование мелкодисперсного исходного материала.

В следующей работе [2] рассматривается проблема моделирования напряженного состояния мезопористых структур на основе кремния (por-Si), насыщенных водой (H₂O), вблизи точки фазового перехода вода–лед. Основное внимание уделяется влиянию кристаллизации воды в порах на механическую устойчивость материала, что особенно актуально для разработки электрохимических устройств, работающих в условиях низких температур. Авторы предлагают теоретическую модель, учитывающую структурные особенности por-Si, включая ориентацию пор и наличие естественного оксидного слоя (SiO₂) на их поверхности.

Математическая модель основана на обобщенном сингулярном приближении (ОСП) теории случайных

полей, которое позволяет анализировать напряженно-деформированное состояние композита. Для описания механических свойств используются операторы концентрации напряжений $K^o(r)$ и деформаций $K^e(r)$, связывающие локальные и усредненные значения тензоров напряжений и деформаций. Учет слоя SiO₂ требует двухэтапного подхода: сначала моделируется композит «лёд–SiO₂», а затем его влияние интегрируется в общую структуру por-Si–H₂O. Для численных расчетов применяется метод самосогласования, где эффективные модули упругости определяются итерационно, а геометрия пор аппроксимируется вытянутыми сфероидами.

Результаты моделирования демонстрируют, что рост объемной доли воды и увеличение безразмерного параметра h/r (отношение толщины оксидного слоя к радиусу поры) приводят к повышению напряжений в кремниевой матрице. Однако даже при максимальных значениях этих параметров напряжения (до 120 МПа) остаются ниже предела прочности кремния (700 МПа), что подтверждает устойчивость por-Si–H₂O к многократным циклам заморозки-оттаивания. Важно отметить, что учет SiO₂ существенно корректирует прогнозируемые напряжения по сравнению с упрощенными моделями, где этот слой игнорируется.

В другой работе [5] исследуется атомная и электронная структура двумерных систем Li-Si и Be-Si, формирующихся на поверхности Si (100), при толщине металлического покрытия от одного до трёх монослоев (МС). Основу исследования составляют методы теории функционала плотности (DFT) и псевдопотенциалов, что позволяет детально проанализировать структурные и электронные свойства изучаемых систем. Авторы демонстрируют, что при одном МС формируются упорядоченные силицидные слои: атомы Li внедряются внутрь верхнего слоя Si, а атомы Be занимают позиции между двумя верхними слоями Si. При этом в электронной структуре наблюдается энергетическая щель вблизи уровня Ферми шириной 1,02 эВ для Li-Si и 0,36 эВ для Be-Si, что свидетельствует о полупроводниковом характере этих систем.

При увеличении толщины покрытия до двух и трёх МС происходит перестройка атомных конфигураций: атомы Li смещаются между слоями Si, а атомы Be поднимаются над поверхностью. Важно отметить, что упорядоченность структуры сохраняется только для Li при двух МС, тогда как для Be уже при двух МС наблюдается неупорядоченное расположение. При трёх МС система Li-Si образует сплошной неупорядоченный смачивающий слой, а Be-Si формирует цепочки без дальнего порядка. Электронная структура при этом претерпевает значительные изменения: энергетическая щель исчезает сначала для Li (при двух МС), а затем для Be (при трёх МС), что указывает на переход к металлическому поведению.

Математическая часть исследования базируется на численных расчётах в рамках метода Кона-Шэма с использованием приближения локальной электронной плотности (LDA). Для моделирования применялся пакет FHI96md, а псевдопотенциалы генерировались с помощью FHI98pp. Расчёты проводились с энергией обрезания 10 Ry и использованием пяти k-точек по схеме Монкхорста (331). Анализ плотности электронных состояний (ПЭС) выполнялся с гауссовым размытием уровней (полуширина 0,05 эВ), что обеспечило высокую точность определения энергетических щелей. Особый интерес представляет расчёт энергии адгезии, показавший, что связь между металлом и кремнием достаточно сильна для формирования силицидов, хотя и слабее, чем в случае переходных металлов, таких как Fe.

Заключение

В представленных исследованиях продемонстрировано разнообразие математических подходов к моделированию сложных физических систем. Фундаментальную роль играет уравнение Шрёдингера, выступающее основой для квантово-химических расчётов электронной структуры наноматериалов. В работе [4] его решение в приближении Хартри-Фока с последующим применением метода OVGf позволило проанализировать квантово-размерные эффекты в легированных нанокристаллах, выявив нелинейную зависимость ширины запрещённой зоны от концентрации примесей.

Для моделирования динамики атомных систем активно используются методы молекулярной динамики с потенциалами погружённого атома [10]. Данный подход,

сочетающий учёт парных взаимодействий и электронной плотности, доказал свою эффективность при исследовании фазовых переходов в металлических наночастицах. В случае макроскопических тепловых процессов [9] применяется конечно-элементное моделирование, где особое внимание уделяется нелинейным эффектам и адаптивным сеткам для точного описания движущихся тепловых источников.

Отдельного внимания заслуживают работы по моделированию сложных гетерогенных систем. Исследование мезопористого кремния [2] демонстрирует важность учёта многослойной структуры пор через обобщённое сингулярное приближение, в то время как анализ эксфолиации графита [1] показывает преимущества стохастических методов перед детерминированными подходами при описании процессов измельчения. Работа [5] подчёркивает чувствительность электронных свойств двумерных систем к атомной структуре, что требует точного подбора параметров в DFT-расчётах.

Общей чертой всех исследований является необходимость компромисса между точностью моделирования и вычислительными затратами. Это достигается за счёт:

- 1) разумных упрощений исходных уравнений,
- 2) комбинирования различных методов,
- 3) оптимизации численных алгоритмов.

Полученные результаты подтверждают, что современное материаловедение требует глубокой интеграции теоретических методов с экспериментальными данными, где математическое моделирование выступает ключевым связующим звеном.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альдавуд Саиф Сухаил Юсуф, Баранов Андрей Алексеевич, Першин Владимир Фёдорович. Математическая модель процесса эксфолиации графита в стержневой барабанной мельнице // Вестник ТГТУ. 2024. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskaya-model-protssesa-eksfoliatsii-grafita-v-sterzhnevoy-barabannoy-melnitse>.
2. Бардушкин Андрей Владимирович, Яковлев Виктор Борисович. Моделирование напряженного состояния структур por-Si — H₂O в окрестности точки фазового перехода воды // Известия вузов. Электроника. 2025. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-napryazhennogo-sostoyaniya-struktur-por-si-h2o-v-okrestnosti-tochki-fazovogo-perehoda-vody>.
3. Галина Г.К., Муртазина Р.Д., Низамова А.Д., Садриева Р.Т., Сидельникова Н.А. Исследование решения одномерного стационарного уравнения шредингера на бесконечности // Вестник Башкирск. ун-та. 2022. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-resheniya-odnomernogo-statsionarnogo-uravneniya-shredingera-na-beskonechnosti>.
4. Жуков Николай Дмитриевич, Клецов Алексей Александрович, Мосияш Денис Сергеевич, Беляев Виктор Васильевич. Моделирование атомных конфигураций нанокристаллов на стадии зародышеобразования // Вестник государственного университета просвещения. Серия: Физика-Математика. 2024. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-atomnyh-konfiguratsiy-nanokristallov-na-stadii-zarodysheobrazovaniya>.
5. Заводинский Виктор Григорьевич, Горкуша Ольга Александровна, Плюснин Николай Иннокентьевич. Компьютерное моделирование смачивающих слоев Li и Be на поверхности Si (100) // Computational nanotechnology. 2024. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompyuternoe-modelirovanie-smachivayuschih-sloev-li-i-be-na-poverhnosti-si-100>.
6. Исмаил Алмикдад, Арутюнян Наталья Рафаэлевна, Образцова Екатерина Александровна, Натсуми Коматсу, Юничиро Коно, Образцова Елена Дмитриевна. Насыщающий поглотитель на основе упорядоченных одностенных углеродных нанотрубок // Труды МФТИ. 2024. №2 (62). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nasyschayuschiy-poglotitel-na-osnove-uporyadochennyh-odnostennyh-uglerodnyh-nanotrubok>.

7. Мажирина Ю.А., Мельников Л.А., Коныхов А.И. Генерация запутанных импульсов при взаимодействии солитонов и при распаде двухсолитонного бризера в волокне с переменной дисперсией // Фотон-экспресс. 2023. №6 (190). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/generatsiya-zaputannyh-impulsov-pri-vzaimodeystvii-solitonov-i-pri-raspade-dvuhsolitonного-brizera-v-voлокне-s-peremennoy>.
8. Рахимов Рустам Хакимович. Импульсный туннельный эффект: фундаментальные основы и перспективы применения // Computational nanotechnology. 2024. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/impulsnyy-tunnelnyy-effekt-fundamentalnye-osnovy-i-perspektivy-primeneniya>.
9. Самотугин Сергей Савельевич, Реуцкий Николай Михайлович, Шекшеев Максим Александрович. Математическое моделирование процесса плазменного наноструктурирования твердосплавного инструмента // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-protseсса-plazmennogo-nanostrukturirovaniya-tverdosplavnogo-instrumenta>.
10. Цыдыпов Дамдин Галсанович, Номоев Андрей Валерьевич, Гармаев Баир Заятуевич. Определение теплофизических свойств и функции радиального распределения наночастицы серебра с применением численных методов // Доклады АН ВШ РФ. 2023. №3 (60). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-teplofizicheskikh-svoystv-i-funksii-radialnogo-raspredeleniya-nanochastitsy-serebra-s-primeneniem-chislennyh-metodov>.

© Силантьев Данила Михайлович (silad.micher@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MODERN METHODS OF MATHEMATICAL MODELING IN LASER MATERIAL PROCESSING TECHNOLOGIES

D. Silantev

Summary. The article presents a systematic analysis of current research in the field of laser material processing with an emphasis on the mathematical models employed. Various classes of computational methods are reviewed, including transient heat transfer models based on the unsteady heat conduction equation, finite element modeling (COMSOL, ANSYS), multiscale approaches (DFT, molecular mechanics), statistical experimental design methods, and models of plasmonic effects and nonlinear optics. Special attention is paid to hybrid computational schemes that combine different physical approaches. The effectiveness of mathematical modeling for predicting laser processing outcomes and optimizing technological parameters is demonstrated.

Keywords: laser processing of materials, mathematical modeling, heat conduction equation, finite element analysis, DFT modeling, plasmonic effects, nonlinear optics, digital twins, multiscale modeling, optimization of technological processes.

Силантьев Данила Михайлович

*Аспирант, Московский государственный
технологический университет «Станкин»
silad.micher@mail.ru*

Аннотация. В статье представлен системный анализ современных исследований в области лазерной обработки материалов с акцентом на применяемые математические модели. Рассмотрены различные классы вычислительных методов, включая: модели теплопереноса на основе нестационарного уравнения теплопроводности, конечно-элементное моделирование (COMSOL, ANSYS), многомасштабные подходы (DFT, молекулярная механика), статистические методы планирования экспериментов, модели плазмонных эффектов и нелинейной оптики. Особое внимание уделено гибридным вычислительным схемам, объединяющим различные физические подходы. Показана эффективность математического моделирования для прогнозирования результатов лазерной обработки и оптимизации технологических параметров.

Ключевые слова: лазерная обработка материалов, математическое моделирование, уравнение теплопроводности, конечно-элементный анализ, DFT-моделирование, плазмонные эффекты, нелинейная оптика, цифровые двойники, многомасштабное моделирование, оптимизация технологических процессов.

Введение

Современные технологии лазерной обработки материалов представляют собой мощный инструмент для модификации структурных и функциональных свойств широкого класса веществ. В данном обзоре систематизированы ключевые исследования, посвященные математическому моделированию и экспериментальной верификации процессов лазерного воздействия на различные материалы, включая полупроводниковые соединения, металлические сплавы и полимерные композиты.

Анализ рассмотренных работ демонстрирует высокую эффективность численных методов в прогнозировании тепловых полей, фазовых превращений и морфологических изменений при лазерной обработке. Особое внимание уделено корреляции между теоретическими моделями и экспериментальными данными, что подтверждает адекватность применяемых математических подходов.

Практическая значимость исследований заключается в разработке оптимизированных режимов лазерного

воздействия для решения прикладных задач в микроэлектронике, медицинском материаловедении и приборостроении. Полученные результаты создают основу для дальнейшего совершенствования технологий прецизионной обработки материалов с заданными характеристиками.

Обзор литературы

В первой работе [3] представлено комплексное исследование лазерной модификации карбида кремния, сочетающее строгое математическое моделирование с экспериментальной верификацией процессов абляции. Центральным элементом исследования является разработанная авторами физико-математическая модель теплопереноса, описываемая нестационарным уравнением теплопроводности с граничными условиями третьего рода. Модель учитывает температурную зависимость теплофизических параметров SiC, включая нелинейность коэффициента теплопроводности ($\lambda(T) = 4.8 + 0.0023T$ Вт/(см·К)) и объемной теплоемкости ($C_v(T) = 27.25 + 0.015T$ Дж/(см³·град)). Численное решение реализовано методом конечных разностей с использованием

неявной схемы, обеспечивающей устойчивость расчетов при шагах дискретизации $h_x = h_y = 20$ мкм и $\tau = 4$ нс.

Экспериментальные исследования лазерной абляции проводились на установке LPKF ProtoLaserU3 с модулированной добротностью (частота 100 кГц, $\lambda = 355$ нм), демонстрируя хорошее соответствие с модельными предсказаниями. Особый интерес представляют результаты по определению пороговых параметров абляции: при плотности энергии 1.4 Дж/см² наблюдается переход от доминирования термических механизмов разрушения к реализации эффекта кулоновского взрыва. Анализ морфологии обработанных поверхностей методом атомно-силовой микроскопии выявил формирование периодических наноструктур с характерным размером 150 ± 20 нм, что коррелирует с длиной поверхностной плазмонной волны для используемой длины волны излучения.

Прикладное значение работы подчеркивается разработанной методикой прецизионного формирования мезо-структур с управляемыми геометрическими параметрами. Авторы установили, что варьирование скорости сканирования в диапазоне 50–200 мм/с при мощности 3.5–6 Вт позволяет контролировать глубину рельефа от 3 до 25 мкм с точностью ± 0.8 мкм. Полученные результаты открывают новые возможности для создания SiC-компонентов силовой электроники и СВЧ-устройств, где требования к точности обработки поверхности особенно критичны.

В другой работе [8] исследуется влияние наносекундного лазерного излучения ($\lambda = 1064$ нм) на электрические свойства кристаллических пленок селенида свинца (PbSe). Ключевой акцент сделан на взаимосвязи между лазерно-индуцированным тепловым воздействием, структурными изменениями и электрофизическими характеристиками материала.

Использовался импульсный Yb:волоконный лазер с длительностью импульсов 4–50 нс и частотой следования 5–120 кГц. В зависимости от плотности мощности выделены два режима:

1. Режим потемнения ($q \approx 6.4\text{--}18.2$ МВт/см², $T \approx 101^\circ\text{C}$) — характеризуется увеличением поглощения и анизотропным изменением сопротивления.
2. Режим просветления ($q \approx 0.9\text{--}4.4$ МВт/см², $T \approx 353^\circ\text{C}$) — сопровождается образованием аморфного оксида свинца (PbO), приводящего к резкому росту сопротивления (до 27-кратного).

Экспериментально подтверждено, что направление тока относительно лазерных треков существенно влияет на проводимость: при параллельной ориентации сопротивление снижается на 44 %, а при перпендикулярной — возрастает на 153 %. Это объясняется форми-

рованием проводящих каналов вдоль треков и барьерных зон на границах модифицированных областей.

Для анализа температурных полей разработана модель, учитывающая:

- Локальный нагрев в зоне лазерного пятна (диаметр 70–150 мкм).
- Теплоотвод в подложку и окружающую среду.
- Граничные условия с коэффициентами теплоотдачи: 25 Вт/(м²·К) (пленка-воздух) и 100 Вт/(м²·К) (пленка-подложка).

Модель продемонстрировала хорошее согласие с экспериментальными данными:

1. Для режима потемнения расчетная температура в пятне составила 145°C (эксперимент: 101°C).
2. Для просветления — 300°C (эксперимент: 353°C). Небольшие расхождения связаны с учетом нелинейных эффектов, таких как зависимость поглощения от температуры.

Критические параметры:

- Градиенты температуры: 0.8 К/мкм (потемнение) и 1.8 К/мкм (просветление).
- Скорость нагрева: до 4.5 К/мс, что на порядки превышает возможности печного отжига.
- Пространственное разрешение: возможность создания структур с размерами до 100 мкм.

Применение импульсного лазерного излучения позволяет контролируемо модифицировать пленки PbSe, избегая деградации, характерной для высокотемпературного отжига. Разработанная модель адекватно описывает тепловые процессы и может быть использована для оптимизации параметров обработки. Полученные результаты открывают перспективы для создания высокочувствительных ИК-детекторов с заданными электрофизическими свойствами.

В следующей статье [7] исследуется влияние параметров лазерного вспенивания на формирование микро-рельефа поверхности титанового сплава ВТ6 с целью оптимизации остеointegrативных свойств медицинских имплантатов. Авторы подчеркивают, что первоначальная механическая фиксация имплантата (press-fit) постепенно сменяется биологической остеointegrацией, включающей три ключевые стадии: остеиндукцию, остеокондукцию и остеоимитацию. Для управления этим процессом предложена технология лазерного вспенивания, которая создает развитую пористую структуру без изменения химического состава материала, что принципиально отличает ее от традиционных методов обработки поверхности.

Основное внимание уделено математическому моделированию процесса лазерного воздействия с исполь-

зованием ротatableльного равномер-планирования эксперимента. В ходе исследования варьировались четыре ключевых параметра: мощность лазера (1050–1650 Вт), скорость подачи (5050–9500 мм/мин), скважность импульса (23–63 %) и давление газа (1–9 Bar). В результате обработки экспериментальных данных получена нелинейная регрессионная модель, описывающая зависимость глубины пор от параметров обработки. Особый интерес представляет квадратичный характер зависимостей, свидетельствующий о наличии оптимальных значений параметров для достижения требуемой геометрии пор (100–300 мкм по ширине и до 1500 мкм по глубине).

Важным аспектом исследования стало изучение влияния газовой среды на химический состав поверхности. Показано, что использование аргона при давлениях выше 8 Bar позволяет минимизировать образование оксидов и карбидов, которые негативно влияют на механические свойства поверхностного слоя. Лазерное воздействие в воздушной среде приводит к появлению в поверхностном слое значительного количества кислородсодержащих соединений, увеличивающих хрупкость материала. Электронная микроскопия подтвердила, что обработка в аргонной среде сохраняет химическую чистоту поверхности, что критически важно для обеспечения стабильной остеоинтеграции.

Авторы делают вывод о перспективности предложенной технологии, подчеркивая возможность точного управления геометрией пор за счет регулирования параметров лазерного воздействия. Полученные результаты позволяют рекомендовать конкретные режимы обработки: мощность излучения 1.2 кВт, скорость подачи 8000 мм/мин, скважность импульса 43 %, давление аргона 8 Bar. Эти параметры обеспечивают формирование поверхности с оптимальными для остеоинтеграции характеристиками. Особое значение имеет вывод о необходимости поддержания давления газа на уровне не менее 8 Bar для полного удаления остатков расплава из зоны обработки, что подтверждено экспериментальными данными.

Статья посвящена математическому моделированию процессов селективного лазерного плавления (SLM) при изготовлении высокопористых имплантатов из сплава Ti6Al4V. Основное внимание уделено анализу тепловых полей, формирующихся под воздействием лазерного излучения, и их влиянию на качество получаемых изделий. Авторы подчеркивают, что прямое измерение температурных полей в зоне обработки затруднительно из-за высокой скорости лазерного воздействия, что делает численное моделирование ключевым инструментом для прогнозирования параметров процесса.

В другой работе [5] использована конечно-элементная модель, разработанная в COMSOL Multiphysics, ко-

торая учитывает теплопередачу, фазовые превращения, конвективное охлаждение и излучение. Модель позволяет анализировать распределение температуры в зависимости от мощности лазера, времени экспозиции и расстояния между точками засветки. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными, полученными при сплавлении единичных дорожек на установке Realizer SLM 50. Установлено, что отклонения расчетных значений ширины дорожки и глубины проплавления от экспериментальных не превышают 5–10 %, что подтверждает адекватность модели.

Особое внимание уделено оптимизации технологических режимов для минимизации дефектов, таких как пористость, шероховатость поверхности и остаточные напряжения. Показано, что сочетание высокой мощности лазера с низкой скоростью сканирования приводит к перегреву и испарению материала, тогда как недостаточная мощность вызывает неполное проплавление слоя. Наилучшие результаты достигнуты при промежуточных значениях параметров, обеспечивающих стабильное формирование структуры имплантата.

В заключении отмечается, что разработанная модель позволяет прогнозировать геометрические и механические характеристики изделий, что особенно важно для создания высокопористых структур с заданными свойствами. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации SLM-процессов в медицинской имплантологии, включая изготовление градиентных материалов с регулируемой жесткостью.

В иной статье [1] исследуется влияние многократного использования порошка полиамида PA6 в процессе лазерного спекания (LS) на его свойства и качество получаемых изделий. Основное внимание уделено математическому моделированию и анализу изменений морфологии частиц, плотности, кристалличности и вязкости порошка, а также их влиянию на процесс лазерного спекания. Использование лазера в данном контексте рассматривается как ключевой фактор, определяющий степень консолидации частиц и качество конечных изделий.

Исследование начинается с качественного анализа изменений формы, размера и распределения частиц PA6 при повторном использовании. На основе микроскопических изображений (увеличение 500x и 1000x) показано, что с увеличением числа итераций обработки порошок подвергается агломерации, что приводит к снижению насыпной плотности (с 0,5 до 0,33–0,35 г/см³). Математическая обработка данных позволила выявить корреляцию между количеством циклов переработки и ростом агломератов, что негативно влияет на упаковку частиц и, как следствие, на плотность спеченных изделий.

Ключевым аспектом работы является анализ тепловых свойств порошка и спеченных образцов с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC). Установлено, что кристалличность порошка увеличивается с 25 % до 31 % после нескольких итераций из-за эффекта отжига в камере LS. Это требует корректировки параметров лазерного воздействия, поскольку для плавления более кристаллического материала необходима повышенная энергия. Однако в данном эксперименте мощность лазера оставалась постоянной, что привело к ухудшению консолидации частиц и росту пористости изделий.

Моделирование реологических свойств с использованием регрессии Карро-Ясуды показало увеличение вязкости порошка с ростом числа итераций, что связано с постконденсацией полимерных цепей. Это подтверждается данными о росте молекулярной массы (с 75 970 до 126 340 г/моль). Ухудшение текучести расплава негативно сказалось на качестве спекания, что подтвердили механические испытания: прочность и модуль упругости образцов снижались с каждой последующей итерацией.

В следующей статье [4] исследуется процесс лазерной сварки-пайки разнородных сплавов на основе титана и алюминия с использованием численного моделирования. Основная сложность заключается в образовании хрупких интерметаллидных фаз при смешивании расплавов, что ухудшает механические свойства соединения. Для решения этой проблемы предложена математическая модель теплопереноса в квазистационарном приближении, учитывающая фазовые переходы и краевые условия лазерного воздействия.

Модель основана на трёхмерном уравнении теплопроводности, решаемом методом коллокации и наименьших квадратов на адаптивной сетке. Особое внимание уделено параметрам лазерного воздействия: мощности, скорости перемещения луча и расстоянию до поверхности контакта. Расчёты показали, что при мощности 2.28 кВт и скорости 1.8 м/мин оптимальное расстояние составляет 0.5–1 мм, что обеспечивает нагрев алюминия до температуры плавления без расплавления титана. Время контакта расплава менее 0.13 с предотвращает образование интерметаллидов.

В другой работе [2] исследуется теплопроводность многослойных композиционных материалов методом лазерной вспышки (LFA), с учетом влияния граничного термического сопротивления между слоями. Ключевая проблема заключается в том, что стандартные импульсные методы, основанные на анализе температурного отклика тыльной поверхности образца после лазерного воздействия, дают значительную погрешность для тонких и многослойных структур. Это связано с конечной длительностью лазерного импульса (~3–4 мс), дискрети-

зацией сигнала АЦП (500 кГц) и, главное, — с неидеальным тепловым контактом на межфазных границах.

Для учета этих эффектов применяется трехслойная математическая модель, где термическое сопротивление составного образца описывается аддитивной суммой сопротивлений каждого слоя и контактных границ. Экспериментально показано, что при чистом контакте «металл-металл» погрешность измерений достигает 50 % из-за микронеровностей поверхностей, приводящих к точечному теплообмену. Введение высокотеплопроводных прослоек (графитовая смазка, силиконовое масло) снижает контактное сопротивление на порядок, что подтверждается согласованием данных с однослойной моделью.

Особый интерес представляет численное моделирование теплопереноса на микроуровне (например, в COMSOL или ANSYS), позволяющее связать морфологию поверхности с эффективным термическим сопротивлением. Однако авторы отмечают, что для точного моделирования требуется предварительное исследование микроструктуры контакта, что усложняет методику. Таким образом, несмотря на высокую точность LFA-метода для монолитных образцов, при работе с многослойными системами необходимо либо минимизировать контактные потери, либо вводить поправочные коэффициенты, основанные на экспериментальных данных.

В иной работе [9] исследуется механизм гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) в системе пластиковых микросфер (300 нм), частично покрытых серебряной нанопленкой. Авторы применяют электродипольную модель, где молекула, возбуждаемая лазером на длине волны 532 нм (зелёный диапазон), излучает стоксов сигнал со сдвигом 1000 см^{-1} , что соответствует 562 нм. Моделирование в COMSOL Multiphysics показывает, что при толщине серебряного слоя 10–24 нм возникает резонансное усиление электромагнитного поля за счёт возбуждения локализованных плазмонов.

Ключевой вывод: максимальное усиление ГКР-сигнала достигается, когда дипольный излучатель расположен вблизи металлической поверхности (~1 нм), а толщина серебра оптимизирована под плазмонный резонанс. Интересно, что даже частичное покрытие сферы («серебряная шляпка») сохраняет эффект, хотя поле при этом локализуется на границе раздела. Экспериментальные СЭМ-изображения подтверждают морфологию таких структур.

В следующей работе [6] исследуются нелинейные оптические свойства ниобата лития (LiNbO_3), проявляющиеся при взаимодействии кристалла с лазерным излучением. Математическое описание основано на разложении тензора поляризации в ряд по степеням

напряженности электрического поля, где квадратичная нелинейность обусловлена электрооптическим эффектом Поккельса. Анализ изменения оптической индикатрисы кристалла под действием внешнего поля проводится через решение задачи условной оптимизации для определения главных показателей преломления, что позволяет рассчитать фазовую задержку между обыкновенной и необыкновенной волнами. Численное моделирование в Wolfram Mathematica подтверждает возможность управления фазовым сдвигом вплоть до π радиан при напряженности поля порядка 150 кВ/м.

Экспериментальные исследования взаимодействия лазерного излучения ($\lambda = 532$ нм) с кристаллом LiNbO_3 включали анализ коноскопических картин и измерение фазовых характеристик. Установлено, что приложенное электрическое поле вызывает поворот эллипсоида показателей преломления, что приводит к модуляции интенсивности прошедшего излучения. Полученные данные хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями: измеренное напряжение полуволновой модуляции составило 920 В при расчетном значении 919.98 В. Особое внимание уделено влиянию кристаллографической ориентации на электрооптические коэффициенты, что проявляется в анизотропии нелинейного отклика.

В последней работе [10] использован комбинированный подход математического моделирования, основанный на методах нелокального функционала плотности (DFT) и молекулярной механики (ММ), что позволило исследовать структурные и энергетические характеристики многослойных наночастиц Si/Ge.

Заключение

Проведенный анализ современных исследований в области лазерной обработки материалов выявил эффективность применения различных классов ма-

тематических моделей для описания сложных физико-химических процессов. В рассмотренных работах продемонстрирована адекватность следующих математических подходов:

1. Модели теплопереноса на основе нестационарного уравнения теплопроводности с граничными условиями третьего рода, включая учет температурной зависимости теплофизических параметров. Численное решение реализовано методами конечных разностей и конечных элементов с применением неявных схем, обеспечивающих устойчивость расчетов при характерных пространственных (20 мкм) и временных (4 нс) шагах.
2. Многомасштабные модели, сочетающие:
 - макроскопическое описание тепловых полей;
 - мезоскопическое моделирование фазовых переходов;
 - микроскопический анализ плазмонных эффектов и нелинейных оптических явлений.
3. Статистические методы планирования экспериментов (ротатабельный униформ-план) и обработки данных, позволившие установить квадратичные зависимости между параметрами обработки и характеристиками материалов.
4. Квантово-механические подходы (DFT-моделирование) в сочетании с методами молекулярной механики для анализа структурных изменений на атомарном уровне.

Особое значение имеет разработка гибридных вычислительных схем, интегрирующих:

- конечно-элементное моделирование (COMSOL, ANSYS);
- анализ электромагнитных полей с учетом плазмонных резонансов;
- реологические модели полимерных систем (регрессия Карро-Ясуды).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакланов Дмитрий Владимирович, Васильев Илья Михайлович, Воротилин Михаил Сергеевич, Земцова Ольга Григорьевна. Порошковое старение полиамида раб при лазерном спекании и его влияние на характеристики прочности композитной гильзы // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poroshkovoe-starenie-poliamida-раб-pri-lazernom-spekanii-i-ego-vliyanie-na-harakteristiki-prochnosti-kompozitnoy-gilzy>.
2. Баринов Д.Я. Исследование теплопроводности составных многослойных образцов // Труды ВИАМ. 2023. №7 (125). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-teploprovodnosti-sostavnyh-mnogosloynnyh-obraztsov>.
3. Евстигнеев Д.А., Корнышев Н.П. Исследование модификации карбида кремния методами лучевой эрозии в условиях фазового состава атмосферы: обзор // Вестник НовГУ. 2024. №1 (135). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-modifikatsii-karbida-kremniya-metodami-luchevoy-erozii-v-usloviyah-fazovogo-sostava-atmosfery-obzor>.
4. Исаев Вадим Исмаилович, Шапеев Василий Павлович, Черепанов Анатолий Николаевич. Численное моделирование лазерной сварки-пайки сплавов на основе титана и алюминия // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2024. №5 (115). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-lazernoy-svarki-payki-splavov-na-osnove-titana-i-alyuminiya>.
5. Килина Полина Николаевна, Сиротенко Людмила Дмитриевна, Козлов Михаил Сергеевич, Дроздов Андрей Александрович. Теплофизические аспекты обеспечения качества высокопористых имплантатов с ячеистой структурой, полученных методом селективного лазерного плавления // Российский журнал биомеханики. 2023. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teplofizicheskie-aspekty-obespecheniya-kachestva-vysokoporistykh-implantatov-s-yacheistoy-strukturoy-poluchennyh-metodom>.

6. Матвеев Владимир Александрович, Гришенцев Алексей Юрьевич, Коробейников Анатолий Григорьевич. Разработка и изготовление электрооптического модулятора на основе эффекта Поккельса // Приборостроение. 2025. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-izgotovlenie-elektroopticheskogo-modulyatora-na-osnove-effekta-pokkelsa>.
7. Митрошин Александр Николаевич, Нестеров Сергей Александрович, Геращенко Сергей Михайлович, Ксенофонов Михаил Анатольевич. Способ повышения остеоинтеграции изделий медицинской техники на основе лазерного вспенивания металлических поверхностей // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. №3 (47). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposob-povysheniya-osteointegratsii-izdeliy-meditsinskoj-tehniki-na-osnove-lazernogo-vspenivaniya-metallicheskih-poverhnostey>.
8. Ольхова Анастасия Александровна, Патрикеева Алина Александровна, Бутяева Мария Алексеевна, Пушкарева Александра Евгеньевна, Авилова Екатерина Александровна, Москвин Михаил Константинович, Сергеев Максим Михайлович, Вейко Вадим Павлович. Лазерно-индуцированное тепловое воздействие на электрические характеристики фоточувствительных пленок селенида свинца // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/lazerno-indutsirovannoe-teplovoe-vozdeystvie-na-elektricheskie-harakteristiki-fotouchuvstvitelnyh-plenok-selenida-svintsy>.
9. Сарычев А.К., Иванов А.В., Быков И.В., Д Басманов В., Прусаков К.А., Мочалов К.Е. Усиление электромагнитного излучения молекул в пластиковых микросферах с серебряной шляпкой // Современная электродинамика. 2024. №6 (14). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/usilenie-elektromagnitnogo-izlucheniya-molekul-v-plastikovyh-mikrosferah-s-serebryanoy-shlyapkoj>.
10. Терентьева Юлия Владимировна, Безносок Сергей Александрович. Компьютерное моделирование многослойных наночастиц на базе элементарных полупроводников // Известия АлтГУ. 2024. №1 (135). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompyuternoe-modelirovanie-mnogosloynnyh-nanochastits-na-baze-elementarnyh-poluprovodnikov>.

© Силантьев Данила Михайлович (silad.micher@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАДИЕНТНОГО БУСТИНГА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТОИМОСТИ ЦЕННЫХ БУМАГ

APPLICATION OF GRADIENT BOOSTING FOR STOCK PRICE PREDICTION

A. Solobuto
V. Pavlov

Summary. This study examines the application of gradient boosting as a tool for forecasting the value of securities. This machine learning method has proven to be one of the most effective algorithms for solving regression and classification problems due to its ability to model complex nonlinear relationships and its robustness against overfitting when parameters are properly tuned.

To improve prediction accuracy, a careful selection of informative financial and technical indicators that potentially influence the value of securities was conducted. Feature selection was performed based on both expert evaluations and statistical methods for analyzing variable significance. Additionally, the Parzen window method [1], a type of Bayesian optimization, was used for automated parameter tuning. This approach enables efficient exploration of parameter space.

Keywords: gradient boosting, forecasting, feature engineering, stocks, indicators.

Солобута Алексей Викторович

аспирант,

Московский финансово-юридический университет

29352138@s.mfua.ru

Павлов Валерий Анатольевич

Кандидат экономических наук, доцент,

Московский финансово-юридический университет

29359332@s.mfua.ru

Аннотация. В работе рассматривается применение градиентного бустинга в качестве инструмента для прогнозирования стоимости ценных бумаг. Данный метод машинного обучения зарекомендовал себя как один из наиболее эффективных алгоритмов для решения задач регрессии и классификации благодаря способности моделировать сложные нелинейные зависимости и устойчивости к переобучению при правильной настройке параметров.

С целью повышения точности прогнозирования был осуществлён тщательный отбор информативных финансовых и технических индикаторов, которые потенциально влияют на стоимость ценных бумаг. Отбор признаков осуществлялся как на основе экспертных оценок, так и с применением статистических методов анализа значимости переменных.

Также в работе для автоматизированного подбора параметров использован метод Парзеновского окна [1], являющийся одной из разновидностей байесовской оптимизации. Этот подход позволяет эффективно исследовать пространство параметров.

Ключевые слова: градиентный бустинг, задача прогнозирования, оптимизация параметров, ценные бумаги, индикаторы.

Введение

В задачах экономического прогнозирования может содержаться большое количество нелинейных зависимостей между различными показателями, что значительно усложняет возможность сделать надежный прогноз, однако с ростом вычислительных мощностей и улучшением алгоритмов машинного обучения, стали доступны новые подходы к решению данных задач, одной из которых является прогнозирование поведения на рынке ценных бумаг.

Банки, финансовые аналитики, хедж-фонды, а также другие участники рынка массово начинают использовать существующие системы принятия решений, а также разрабатывать собственные механизмы для предсказания финансовых показателей на бирже. В качестве одного из вариантов таких систем в данной работе будет рассмотрен метод градиентного бустинга, а также произведена калибровка параметров модели.

Анализ актуальных исследований в области

Применение градиентного бустинга рассматривается в работе «Исследование методов прогнозирования стоимости ценных бумаг на основе машинного обучения», в ней автор проводит сравнение нескольких методов машинного обучения: линейная регрессия, метод опорных векторов и градиентный бустинг, где градиентный бустинг показывает самый высокий показатель ошибки MAPE [2]. В качестве улучшения предлагается использовать набор признаков, отличный от описанных в указанной статье, где были выбраны параметры с линейной зависимостью, также было решено произвести калибровку гиперпараметров модели.

Преимущества и недостатки модели градиентного бустинга

Градиентный бустинг основан на последовательном построении ансамбля слабых моделей, что даёт ряд преимуществ и недостатков данному алгоритму. Среди сильных сторон в рамках данной задачи стоит выделить:

- 1) Возможность использовать нелинейные зависимости между данными.
- 2) Данный метод имеет устойчивость к выбросам в данных, что позволяет использовать его даже в случае аномальной ситуации на рынке.
- 3) Устойчивость к недообучению — даже на небольших данных модель улавливает связи между признаками.

К недостаткам относятся:

- 1) Сложная интерпретируемость — данный метод использует последовательный ансамбль моделей, что не дает возможности перевести полученную модель на понятный человеку язык.
- 2) Высокая вычислительная сложность — для обучения градиентного бустинга требуются значительные ресурсы, желательно с использованием GPU.
- 3) Чувствительность к переобучению — без калибровки гиперпараметров модель может адаптироваться под данные, что по итогу даст слабую предсказательную способность на новых данных.

Данный метод следует использовать при наличии серьёзных вычислительных ресурсов, а также при наличии нелинейных связей между признаками [3].

Отбор индикаторов

Для отбора индикаторов было принято решение, разделить все данные на три группы: планируется рост,

планируется незначительное колебание цены и планируется падение [4], после чего построить гистограммы для всех индикаторов и отобрать те, где явно выделяются представители отобранных групп. По итогу были выбраны следующие индикаторы: rsi, aroon oscillator, adx, TRIX, MFI, ultimate oscillator, cci, далее будут приведены описания данных индикаторов и их гистограммы:

- Индекс относительной силы (RSI) — индикатор технического анализа, определяющий силу тренда и вероятность его смены [5]. Данный индикатор может принимать значения от 0 до 100. Для задачи классификации используется строгая версия индикатора, в которой значение 80 означает перекупленность бумаги, а значение 20 недокупленность. Гистограмма изображена на рисунке 1.
- Aroon-осциллятор — это технический индикатор, используемый в анализе финансовых рынков для оценки силы и направления тренда, а также для определения возможных точек разворота, основан на двух линиях: Aroon Up и Aroon Down. Aroon-осциллятор представляет собой разницу между этими двумя линиями [6]. Гистограмма изображена на рисунке 2.
- Индикатор ADX (Average Directional Index, средний индекс направленного движения) — технический индикатор, используемый в анализе финансовых рынков для оценки силы тренда, независимо от его направления (восходящего или нисходящего) [7]. Гистограмма изображена на рисунке 3.

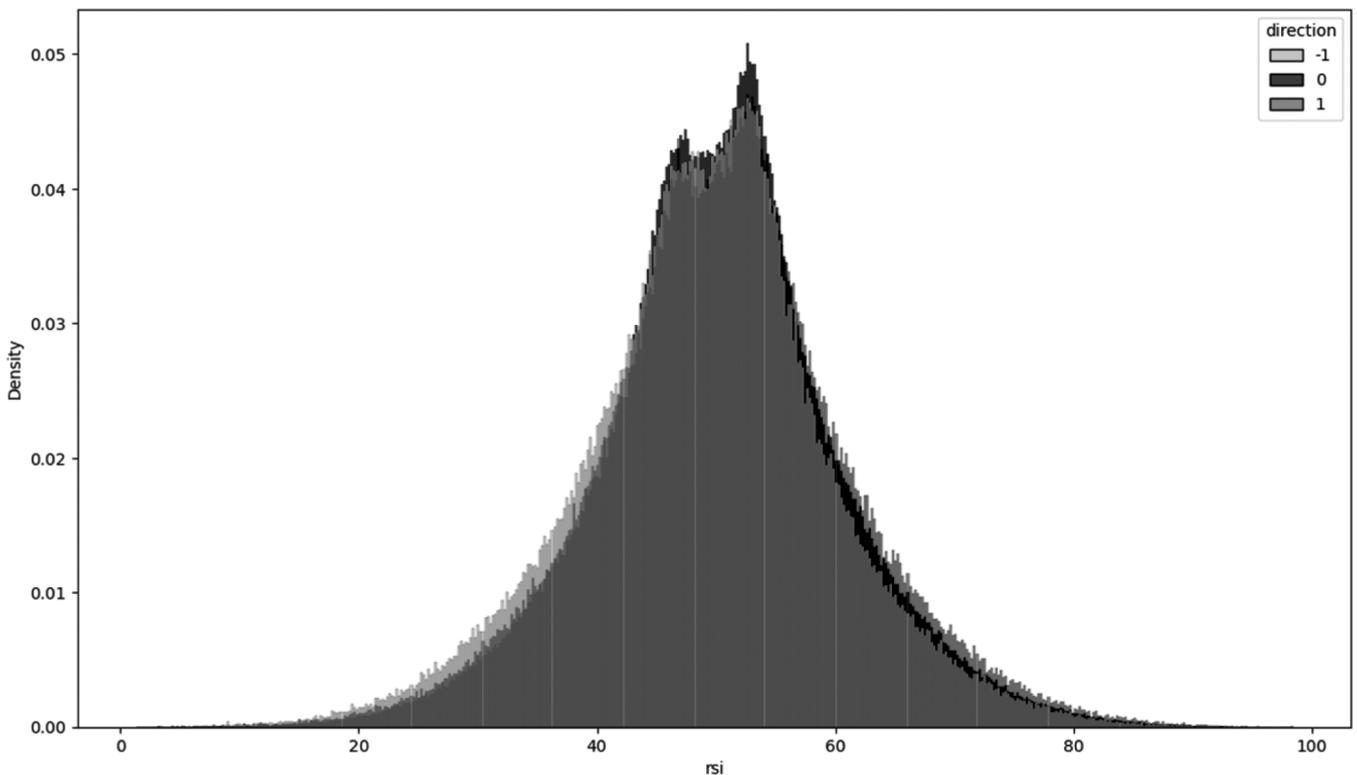


Рис. 1. Гистограмма индикатора rsi

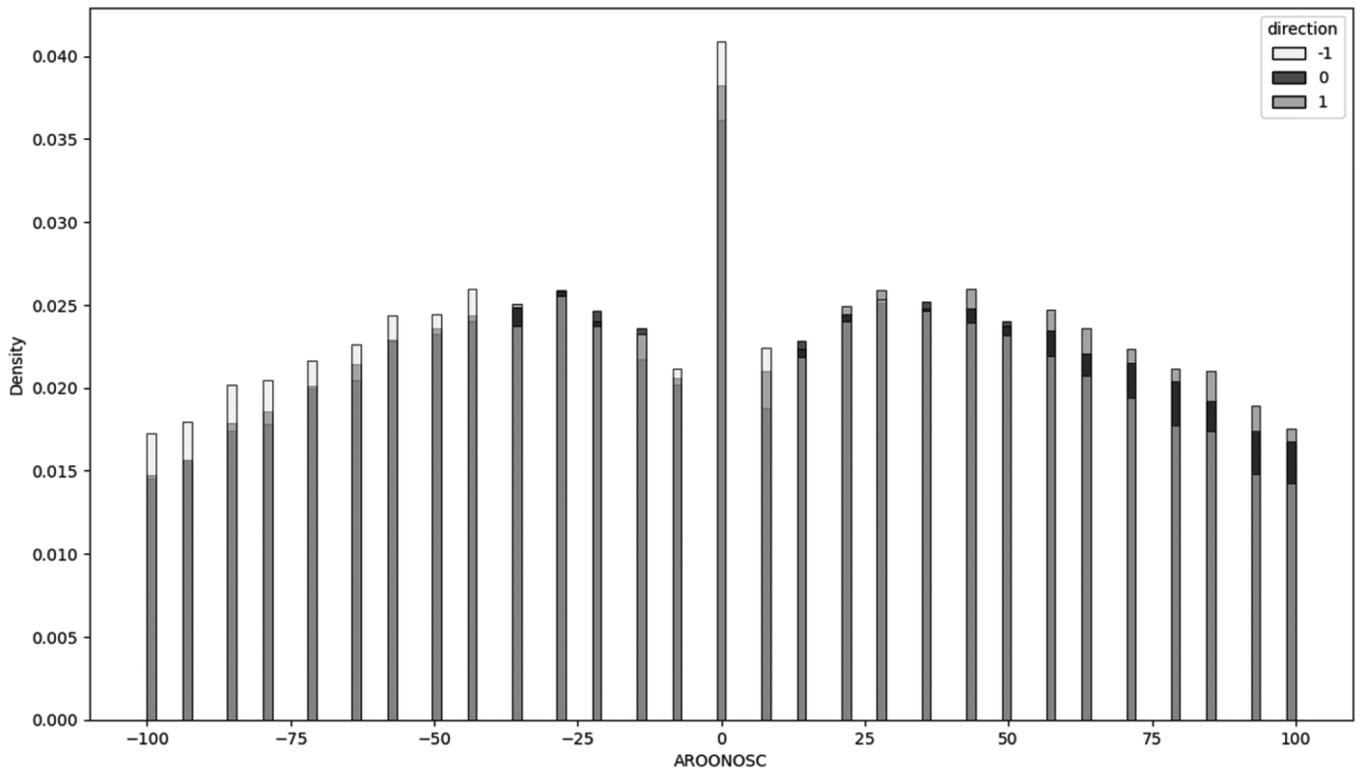


Рис. 2. Гистограмма индикатора aroon oscillator

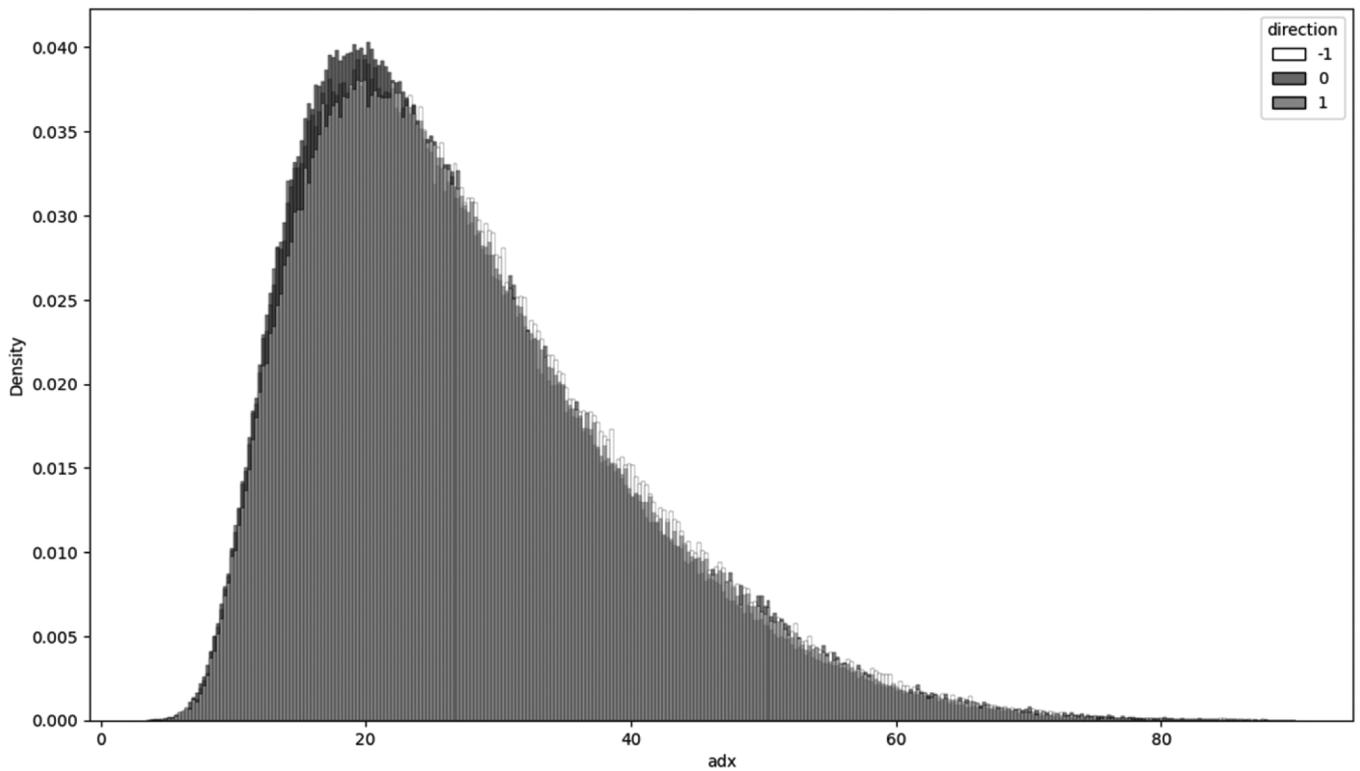


Рис. 3. Гистограмма индикатора adx

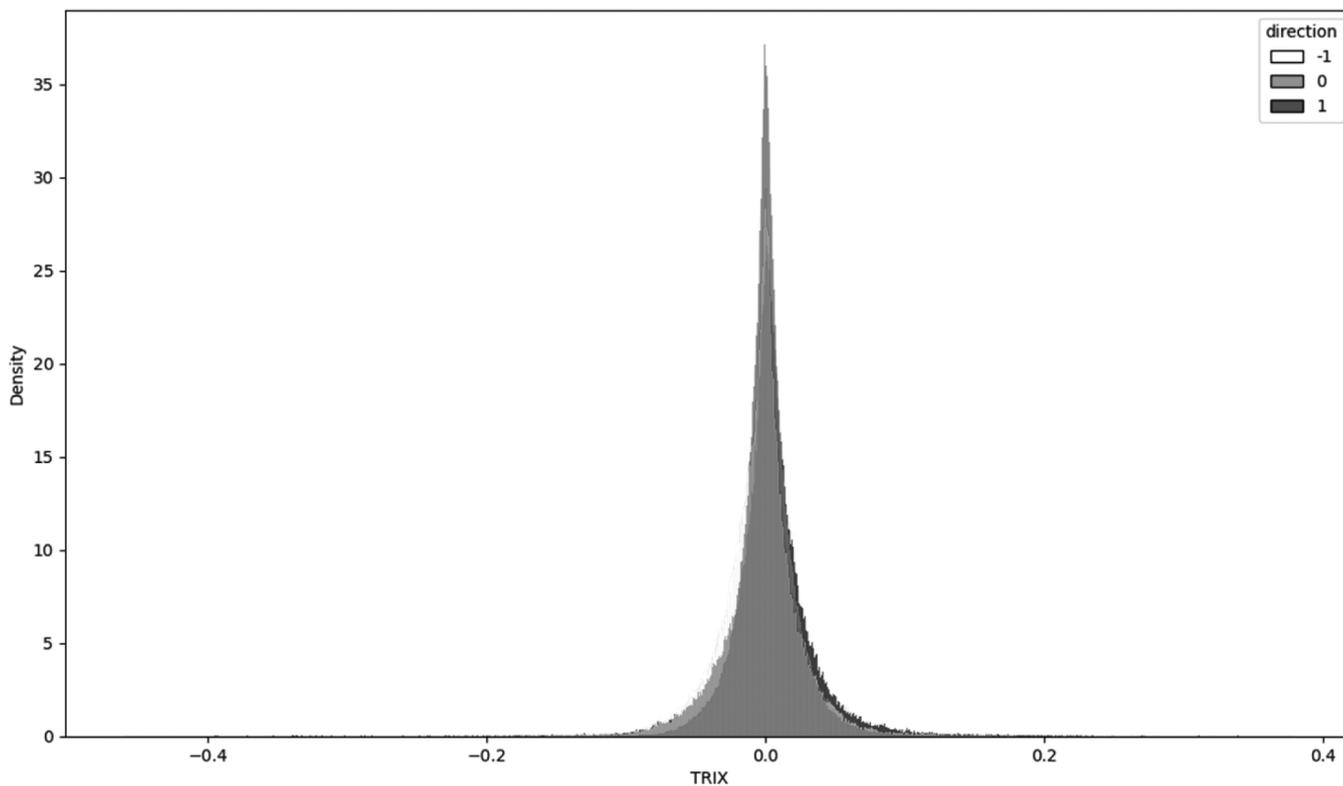


Рис. 4. Гистограмма индикатора TRIX

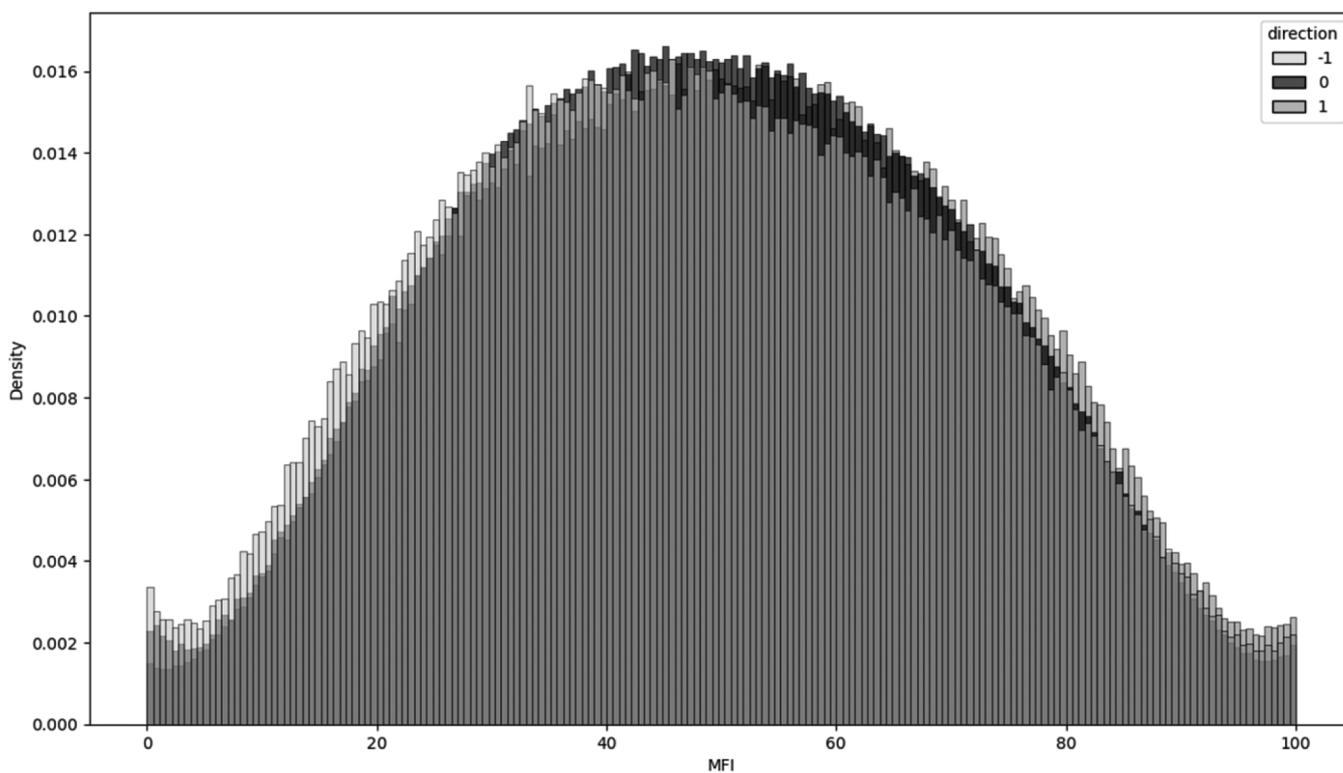


Рис. 5. Гистограмма индикатора MFI

- Индикатор TRIX (Triple Exponential Average) — это технический индикатор, используемый в анализе финансовых рынков для определения трендов и потенциальных точек разворота цены [8]. Гистограмма изображена на рисунке 4.
- Индикатор MFI (Money Flow Index, Индекс денежного потока) — это технический индикатор, который измеряет силу притока и оттока денег в актив, основываясь на изменениях цены и объема торгов. MFI учитывает не только цену, но и объем [9]. Гистограмма изображена на рисунке 5.
- Ultimate Oscillator — индикатор, который комбинирует данные за короткий, средний и длинный периоды — это позволяет сгладить ложные сигналы, которые могут возникать при использовании одного таймфрейма. Индикатор учитывает три ключевых компонента: покупательное давление (Buying Pressure), истинный диапазон (True Range) и взвешенные средние этих значений [10]. Гистограмма изображена на рисунке 6.
- Индекс товарного канала (CCI) — технический индикатор, основанный на анализе текущего изменения отклонения цены от её среднего значения за определённый период и среднестатистического абсолютного значения этого параметра [11]. Гистограмма изображена на рисунке 7.

Обучение модели

Для оптимизации модели были выбраны следующие диапазоны гиперпараметров:

- Скорость обучения (learning rate) — от 0.01 до 0.3
- Максимальная глубина дерева (depth) — от 1 до 10
- Штраф от L2-регуляризации (l2 leaf reg) — от 0.0001 до 10
- Количество границ (border count) — от 1 до 255
- Уровень случайности при формировании деревьев (bagging temperature) — от 0 до 1

Обучение производилось с помощью кросс-валидации на 5 различных наборах данных, итоговое значение MAPE = 0.029, значения гиперпараметров для лучшей модели перечислены в таблице 1.

Таблица 1.

Значения гиперпараметров для лучшей модели

Гиперпараметр	Значение
Скорость обучения	0.155
Максимальная глубина дерева	9
Штраф от L2-регуляризации	6.665
Количество границ	75
Уровень случайности при формировании деревьев	0.909

Заключение

В данной работе была предложена реализация градиентного бустинга в качестве метода прогнозирования

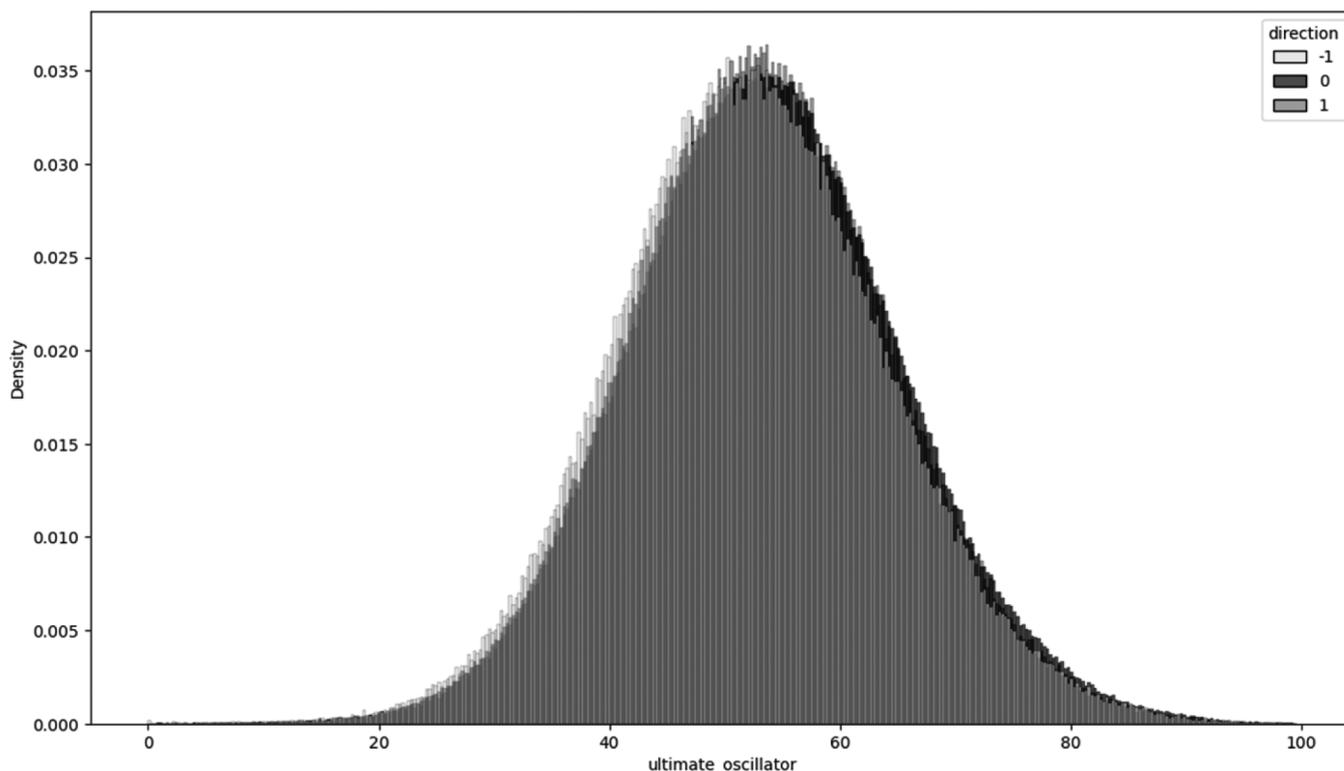


Рис. 6. Гистограмма индикатора ultimate oscillator

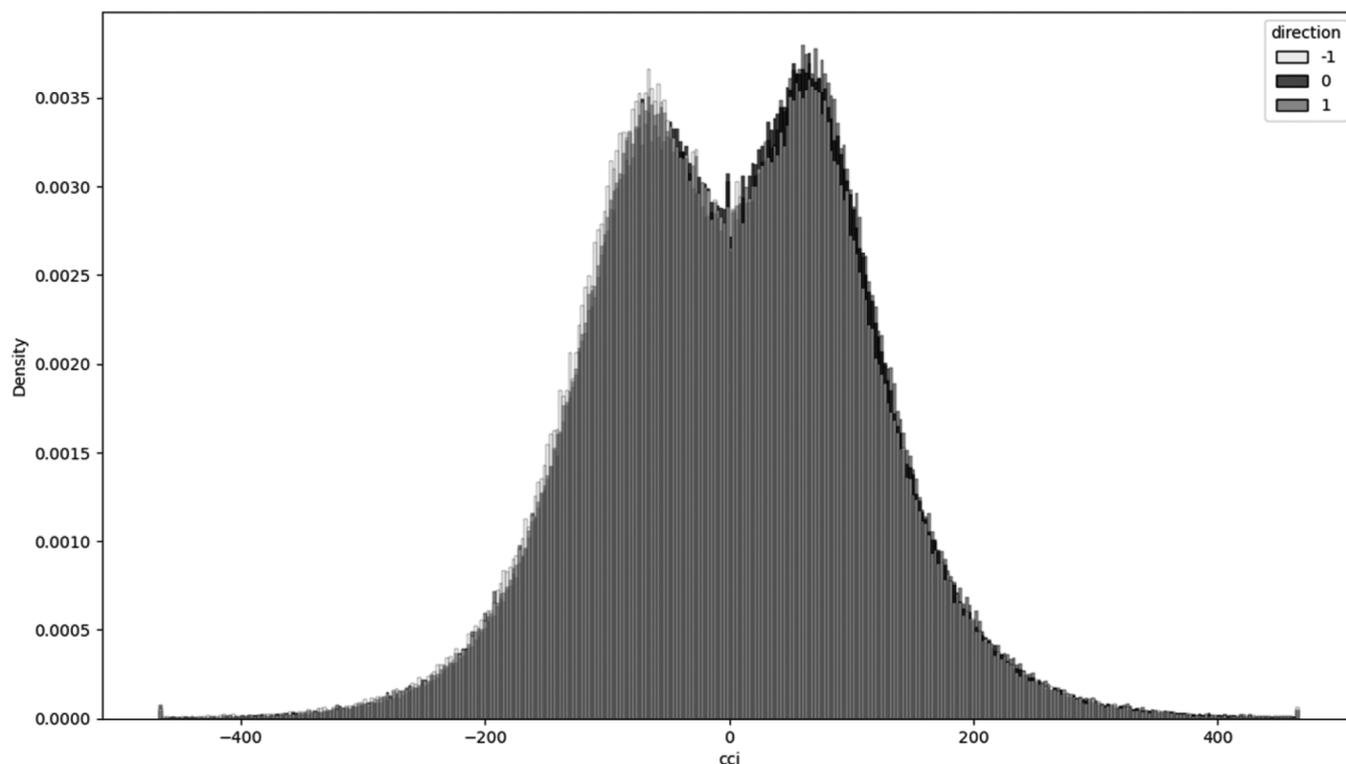


Рис. 7. Гистограмма индикатора csi

стоимости акций на основе признаков, имеющих влияние на итоговую цену, с помощью кросс-валидации была отобрана лучшая модель со значением MAPE = 0.029,

данная точность позволяет использовать эту модель в качестве системы управления инвестиционным портфелем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Christopher M. Bishop Pattern Recognition and Machine Learning. — 1е изд. — Singapore: Springer Science+Business Media, LLC, 2008. — 760 с.
2. Исследование методов прогнозирования стоимости ценных бумаг на основе машинного обучения // Российский университет дружбы народов URL: <https://events.rudn.ru/event/107/papers/504/files/857-Kravets.pdf> (дата обращения: 03.07.2025).
3. Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman The Elements of Statistical Learning. — 1-е изд. — Спб.: «Санкт-Петербургский Центр эволюционных исследований сознания человека» (внутренний путь), 2009. — 764 с.
4. Павлов В.А., Солобута А.В. Предобработка данных в задаче прогнозирования динамики ценных бумаг // Современные и информационные технологии в социальной сфере. — Чебоксары: Волжский филиал МАДИ, 2024. — С. 42–45.
5. Стивен Б. Акелис Technical Analysis from A to Z. — 2 изд. McGraw Hill, 2013. — 400 с.
6. J. Welles Wilder, Jr. New Concepts in Technical Trading Systems — М.: ПРИЗМА-15, pp 40 — 41
7. Колби Роберт Энциклопедия технических индикаторов рынка. — 2 изд. — М.: Альпина Паблишер, 2004. — 837 с.
8. ЛеБо Ч., Лукас Д.В Компьютерный анализ фьючерсных рынков. — 6 изд. — М.: Альпина Паблишер, 2011. — 304 с.
9. Кауфман Перри Системы и методы биржевой торговли. — 1-е изд. — М.: Альпина PRO, 2024. — 1248 с.
10. Донна Л. МакКормик, Джеффри Оуэн Кац Энциклопедия торговых стратегий. — М.: Альпина Паблишер, 2012. — 394 с.
11. Larry Williams Trading Indicators // Larry Williams Trading Indicators URL: <https://williamsperctr.com/newsletters/ULTI.pdf> (дата обращения: 21.04.2025).

© Солобута Алексей Викторович (29352138@s.mfua.ru); Павлов Валерий Анатольевич (29359332@s.mfua.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТОИМОСТИ ЦЕННЫХ БУМАГ

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR PREDICTING THE VALUE OF SECURITIES

A. Solobuto
V. Pavlov

Summary. This paper explores the application of neural networks as a tool for predicting the value of securities based on historical data. To train the model, data preprocessing is carried out, including the construction of time series, which allows for the identification of hidden dependencies between variables. To improve the model's robustness to outliers and reduce the risk of overfitting, regularization methods such as Dropout and L2 normalization are employed. In addition, appropriate activation functions and a loss function were selected to address the specific task. The study demonstrates the potential of neural network approaches in financial forecasting and highlights the importance of selecting the right architecture and tuning model parameters according to the characteristics of the input data.

Keywords: neural networks, time series, regularization, stocks, indicators.

Солобута Алексей Викторович

аспирант,

Московский финансово-юридический университет

29352138@s.mfua.ru

Павлов Валерий Анатольевич

Кандидат экономических наук, доцент,

Московский финансово-юридический университет

29359332@s.mfua.ru

Аннотация. В данной работе рассматривается применение нейронных сетей в качестве инструмента для прогнозирования стоимости ценных бумаг на основе исторических данных. Для обучения модели проводится предобработка информации о ценных бумагах, включая формирование временных рядов, что позволяет выявлять скрытые зависимости между параметрами. С целью повышения устойчивости модели к выбросам и уменьшения риска переобучения используются методы регуляризации, такие как Dropout и L2-нормализация. Кроме того, для решения поставленной задачи были отобраны подходящие функции активации и функция потерь. Работа демонстрирует потенциал нейросетевых подходов в задачах финансового прогнозирования и подчеркивает важность выбора архитектуры и настройки параметров модели в зависимости от характеристик исходных данных.

Ключевые слова: нейронные сети, временные ряды, регуляризация, ценные бумаги, индикаторы.

Введение

Стремительное улучшение алгоритмов машинного обучения открыло новый этап в развитии экономики и значительно расширило её прикладные возможности в сфере финансов и анализа данных. Одним из ключевых направлений этого развития стало применение методов машинного обучения к анализу фондового рынка. Вследствие этого прогресса, технический анализ, существовавший на протяжении всей истории функционирования финансовых бирж, вышел на принципиально новый уровень. Теперь, благодаря использованию систем поддержки принятия инвестиционных решений и значительным вычислительным мощностям, появилась возможность в реальном времени анализировать огромные объёмы информации и мгновенно принимать решения о совершении сделок на основе выявленных закономерностей и рыночных сигналов [1].

Одним из наиболее перспективных и активно применяемых инструментов машинного обучения в данной области являются нейронные сети. Эти модели особенно ценны своей способностью выявлять сложные, скрытые и нелинейные зависимости в больших массивах данных.

Использование нейронных сетей позволяет более точно прогнозировать поведение финансовых инструментов, определять потенциальные точки входа, также адаптироваться к быстро меняющимся условиям финансовых рынков.

В рамках данной работы будут подробно рассмотрены особенности функционирования нейронных сетей при работе с биржевыми данными, включая вопросы их архитектуры, подготовки входных данных, выбора параметров и методов обучения. Будет проведено построение и обучение модели на основе исторических данных биржевых показателей. Кроме того, особое внимание будет уделено анализу результатов прогнозирования, что позволит объективно оценить эффективность применения нейронных сетей в задачах предсказания рыночной стоимости ценных бумаг. Полученные выводы могут служить основой для дальнейшего исследования в данной области и способствовать развитию более точных и надёжных систем автоматического трейдинга.

Источником данных являются 15-минутные данные по бумагам, входящим в индекс мосбиржи 2014 по 2023 годы.

Анализ актуальных исследований в области

Прогнозирования цены акций с помощью нейросетей рассматривается в нескольких работах. В статье «Нейросетевое прогнозирование на рынке ценных бумаг» авторы детально рассматривают процесс обучения нейронной сети на небольшом временном интервале [2].

Также рассматривается применение нейронных сетей в работе «Использование нейронных сетей для прогнозирования стоимости акций на основе новостных данных» в ней автор рассматривает эффективность применения языковых моделей для прогнозирования курса акций [3].

В качестве альтернативного решения задачи прогнозирования, в данной работе предлагается работать с историческими данными по ценным бумагам, как с временным рядом, используя все основные биржевые индикаторы для прогноза.

Предобработка данных

Для обучения нейросети необходимо провести преобразование данных во временной ряд, для этого необходимо провести расчёт всех индикаторов за каждый участок временного интервала. Так, например, для данных за 15 минут необходимо посчитать значения для каждой из предыдущих минут — данный подход позволяет увеличить количество входов нейронной сети, что даёт возможность находить зависимости между большим количеством параметров, чем в других методах машинного обучения [4].

Преимущества и недостатки нейронных сетей

Нейросети могут иметь самую разную архитектуру, в зависимости от задачи, что создает ряд весомых преимуществ, но и накладывает ряд ограничений. К преимуществам следует отнести:

- 1) Возможность дообучать модель на новых данных, используя уже существующую — это позволяет экономить время в задачах, где постоянно приходится иметь дело с новыми данными.
- 2) Возможность находить нелинейные зависимости между данными
- 3) Параллельная обработка данных

К недостаткам же следует отнести:

- 1) Невозможность интерпретировать
- 2) Требования к большим вычислительным мощностям — данная задача за адекватное количество времени решается только на GPU
- 3) Для обучения необходимо большое количество данных, иначе существует высокий риск недообучения.

Исходя из перечисленного, можно сказать, что для задачи прогнозирования курса ценных бумаг, применение нейронных сетей является эффективным, так как для работы с биржевыми данными необходимо постоянно обновлять модель, а большая часть биржевых параметров нелинейно связана с ценой.

Выбор функции активации

Для решения задачи регрессии используются несколько основных функций активации: Linear, ReLU, Leaky ReLU и Swish.

Функция активации Linear подходит, если между входными переменными имеется линейная зависимость [4], что не подходит в рамках данной задачи, так как большая часть параметров связаны между собой нелинейно.

Для данной задачи базовая реализация ReLU также не является целесообразной, т.к. она обнуляет отрицательные значения [5], что не позволяет заходить в короткие позиции.

Из оставшихся функций активации выбор остановился на Leaky ReLU, поскольку функция активации swish подходит для нейросетей с числом скрытых слоев больше 40 [6], что делает её более подходящей для работы с изображениями, чем с табличными данными.

Выбор функции потерь

Из двух основных функций потерь MAE и MSE выбор был сделан в пользу MAE, так как среди данных по ценным бумагам присутствует огромное количество выбросов, что может привести к переобучению при использовании MSE [7].

Описание архитектуры

Количество слоев нейронной сети равно 9, количество нейронов на входном слое равно 256, каждый слой в 2 раза меньше предыдущего, в качестве функции активации на каждом слое используется leaky ReLU [8], также после каждого слоя применяются методы регуляризации batch normalization [9] и dropout [10].

Leaky ReLU возвращает само значение при положительном входном значении, а при отрицательных значениях возвращает линейную функцию от входа, умноженную на небольшой коэффициент, называемый отрицательным уклоном (leak). Таким образом, у нейрона всегда есть возможность вносить вклад в выходную функцию, даже если входные данные отрицательны. Что позволяет избежать переобучения, связанного с использованием индикаторов, принимающих отрицательные значения.

Способ регуляризации Batch Normalization решает сразу несколько задач: борется со взрывом градиента, улучшает сходимость обучения, уменьшает зависимость от гиперпараметров и влияние инициализации весов. Все эти проблемы являются критичными для данной модели, т.к. используется большое количество входных сигналов нейронной сети и какая-то комбинация может просто минимизировать эффект всех остальных нейронов. Также в качестве регуляризации применяется dropout, чтобы минимизировать влияние конкретных нейронов, ускорить обучение и минимизировать шанс переобучения.

В качестве функции потерь была выбрана MAE, так как стояла необходимость минимизировать влияние выбросов [11], которых в исторических данных по фондовым рынкам значительная часть.

Также был использован метод адаптивной оценки моментов Adaptive Moment Estimation, Adam. Данный метод сходится к локальному минимуму быстрее большинства базовых алгоритмов оптимизации [12], что важно при работе с большим количеством признаков.

Обучение нейронной сети

Данная нейронная сеть обучаются в 500 итераций. В одной итерации происходит обнуление градиентов

в оптимизаторе, прямое распространение, подсчёт значения функции потерь, вычисление градиента для функции потерь, изменение весов с помощью оптимизатора, вычисление метрики качества.

Также в процессе обучения все данные делятся на наборы по 128 объектов, чтобы оптимизировать затраты по оперативной памяти.

На каждом этапе происходит накопление градиентов следующим образом: старые градиенты весов и сдвигов нейронной сети после обратного распространения ошибки суммируются с новыми.

После обучения модели проведена проверка на тестовых данных, где MAPE = 0.024.

Заключение

Рассмотренная архитектура нейронной сети показала результат MAPE = 0.024, что говорит о возможности её использовать в реальных моделях принятия решений. В дальнейшем можно расширять подобный подход, меняя архитектуру сети, подбирая регуляризацию к конкретным нейронам и отбирая индикаторы для модели, что позволит ещё сильнее снизить погрешность модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ernie Chan Algorithmic Trading. Winning Strategies and Their Rationale. — 1-е изд. — San Francisco: Wiley, 2017. — 225 с.
2. Лобачёва Е.Н., Кузнецова Т.И., Кульчицкий С.Е. Нейросетевое прогнозирование на рынке ценных бумаг // Гуманитарный вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2020. — №5. — С. 153–161.
3. Использование нейронных сетей для прогнозирования стоимости акций на основе новостных данных // Сайт экономического факультета МГУ URL: <https://www.econ.msu.ru/sys/raw.php?o=97187&p=attachment> (дата обращения: 15.07.2025).
4. Vinod Nair, Geoffrey E. Hinton Rectified Linear Units Improve Restricted Boltzmann Machines // 27th International Conference on International Conference on Machine Learning. — Toronto: Omnipress, 2010. — С. 807–814.
5. Michael S. Gashler, Stephen C. Ashmore Training Deep Fourier Neural Networks to Fit Time-Series Data // International Conference on Intelligent Computing. — Cham: Springer, 2010. — С. 48–55.
6. Bing Xu, Naiyan Wang, Tianqi Chen, Mu Li. Empirical Evaluation of Rectified Activations in Convolutional Network // Computer Vision and Pattern Recognition. — 2015. — №32. — С. 28–33.
7. Павлов В.А., Солобуто А.В. Предобработка данных в задаче прогнозирования динамики ценных бумаг // Современные и информационные технологии в социальной сфере. — Чебоксары: Волжский филиал МАДИ, 2024. — С. 42–45.
8. A Continuum among Logarithmic, Linear, and Exponential Functions, and Its Potential to Improve Generalization in Neural Networks // scitepress URL: <https://www.scitepress.org/papers/2015/56358/56358.pdf> (дата обращения: 15.07.2025).
9. Batch Normalization in Deep Networks // LearnOpenCV URL: <https://learnopencv.com/batch-normalization-in-deep-networks/> (дата обращения: 15.07.2025).
10. Nitish Srivastava, Geoffrey Hinton, Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever, Ruslan Salakhutdinov Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting // Journal of Machine Learning Research. — 2014. — №15. — С. 1930–1960.
11. Klebanov L., Rachev S.T., Fabozzi F. Robust and Non-Robust Models in Statistics. — 1-е изд. — New York: Nova Scientific Publishers, 2009. — 225 с.
12. Why Momentum Really Works // Distill URL: <https://distill.pub/2017/momentum/> (дата обращения: 15.07.2025).

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОГО RL-АГЕНТА ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В ММО-СИМУЛЯЦИИ

THE USE OF AN ADAPTIVE RL AGENT FOR DYNAMIC REGULATION OF ECONOMIC FLOWS IN AN MMO SIMULATION

*M. Figurov
V. Mishchuk*

Summary. Regulation of economic flows in closed virtual economies is one of the most urgent tasks in the modern field of information technology. Unlike in the real world, the value of a virtual currency directly depends on the proper configuration of its sources of origin and distribution, called faucets and sinks. Mistakes in regulating economic flows lead to economic destabilization, a sharp spike in inflation or deflation, and the collapse of the virtual market, which in the long run leads to a decrease in the number of users and large financial losses. Traditionally, the balance of the virtual economy is handled by a whole department of specialists who respond promptly to shocks. This paper explores the possibility of automating this process using the Reinforcement Learning method.

This article discusses the development and application of an adaptive RL agent capable of managing key economic parameters in real time to stabilize the money supply in the virtual economy of the EvE online MMO game.

The software package developed because of the research demonstrates the ability not only to maintain system stability, but also to apply various strategies for emergency response to crises, which opens prospects for the development of self-regulation mechanisms in virtual economies.

Keywords: virtual economy, reinforcement learning, Bellman equation, mathematical modeling, dynamic regulation, neural networks.

Фигуров Максим Олегович

Аспирант,

Балтийский федеральный университет им. И. Канта

impromaximus@gmail.com

Мищук Богдан Ростиславович

кандидат физико-математических наук, доцент,

Балтийский федеральный университет им. И. Канта

b.mishchuk@yandex.ru

Аннотация. Регулирование экономических потоков в замкнутых виртуальных экономиках является одной из наиболее актуальных задач в современной сфере информационных технологий. В отличие от реального мира, ценность виртуальной валюты прямо зависит от грамотной настройки источников её возникновения и сбыта, именуемых faucets и sinks. Ошибки в регулировании экономических потоков приводят к дестабилизации экономики, резкому скачку инфляции либо дефляции и обвалу виртуального рынка, что в долгосрочной перспективе приводит к снижению числа пользователей и большим финансовым потерям. Традиционно балансом виртуальной экономики занимается целый отдел специалистов, которые оперативно реагируют на шоковые воздействия. В настоящей работе исследуется возможность автоматизации данного процесса с помощью метода обучения с подкреплением (Reinforcement Learning).

В настоящей статье рассмотрен вопрос разработки и применения адаптивного RL-агента, способного в режиме реального времени регулировать ключевые экономические параметры для стабилизации денежной массы в виртуальной экономике ММО-игры EvE online.

Разработанный в результате исследования программный комплекс демонстрирует способность не только поддерживать стабильность системы, но и применять различные стратегии для экстренного реагирования на кризисы, что открывает перспективы для разработки механизмов саморегуляции в виртуальных экономиках.

Ключевые слова: виртуальная экономика, reinforcement learning, уравнение Беллмана, математическое моделирование, динамическое регулирование, нейросети.

Введение

Виртуальная экономика в онлайн-играх и мета-сервисах является симулятором, прообразом которого служит экономика реального мира, за исключением того, что вся генерация валюты и ресурсов внутри системы полностью подконтрольна разработчикам и не привязана к чему-либо материальному [1]. Тем не менее доход с неё вполне реален: к примеру, согласно финансовым отчетам по состоянию на 2022 год, популярная ММО игра World of Warcraft принесла разработчикам порядка

12.8 миллиардов долларов [2]. Рынок игровой индустрии демонстрирует экспоненциальный рост за последнее десятилетие с лидирующим трендом на создание виртуальных миров и онлайн-сервисов с собственной экономикой [3]. Однако для достижения стабильности виртуальной экономики без ущерба для игрового процесса, разработчикам приходится балансировать замкнутую экономическую систему таким способом, чтобы она исключала критические состояния, такие как инфляция или дефляция, а также была максимально прозрачной и справедливой по отношению к своим участникам.

Объектом исследования в данной работе выступает процесс динамического регулирования экономических потоков в модели, построенной на основе открытых данных по экономике MMO-игры EVE Online. Особое внимание было уделено разработке и анализу адаптивного RL-агента, способного автономно управлять ключевыми экономическими параметрами. Результаты работы данного программного комплекса были представлены в научной работе, где они служат примером эффективного применения машинного обучения с подкреплением при решении задачи динамического регулирования потоков денежных масс внутри замкнутой виртуальной экономики.

Целью настоящей научно-исследовательской работы является проектирование и разработка программного комплекса на базе RL для решения проблемы для динамического регулирования экономических потоков в MMO-симуляции.

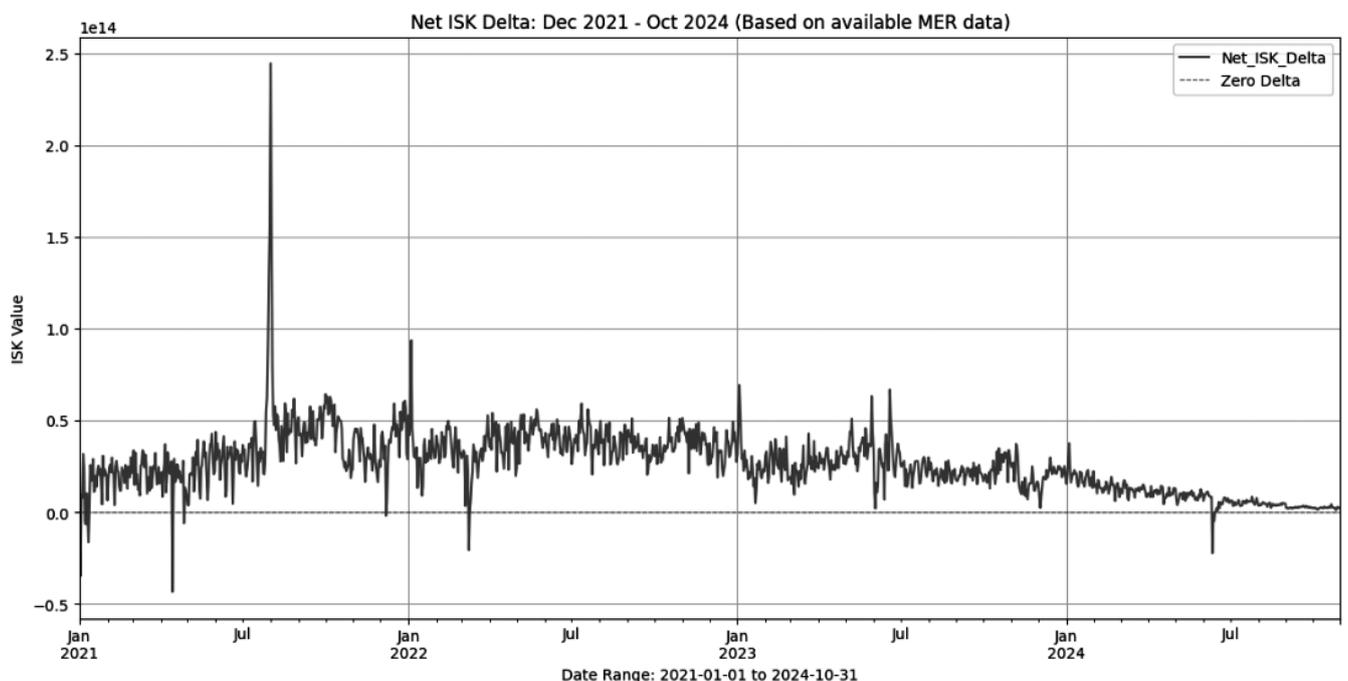
Задачами исследования являются:

1. Анализ экономической системы EVE Online и выявление основных проблем с её регулированием.
2. Разработка математической модели виртуальной экономической среды для RL-агента и его обучение.
3. Разработка прототипа программного комплекса динамического регулирования экономических потоков в виртуальной экономике и анализ результатов его работы.

Методы исследования

Виртуальная экономика многопользовательских онлайн-проектов обычно устроена таким образом, что внутриигровые механики проекта направлены на получение или трату игроками виртуальной валюты. Источники получения валюты и точки её сбыта строго контролируются разработчиками и именуются «кранами» (англ. faucets) и «раковинами» (англ. sinks) [4]. Ключевая задача разработчиков — настроить экономические потоки таким образом, чтобы не допускать возникновения неконтролируемой инфляции или дефляции валюты, особенно при возникновении шоковых воздействий на рынок, таких как глобальные обновления проекта, эксплойты системы или масштабные внутриигровые события.

Показательным примером сложной, управляемой игроками экономики является MMO EVE Online. Для анализа её актуального состояния разработчики ежемесячно публикуют отчеты MER (Monthly Economic Reports), представляющие собой открытые данные по различным аспектам актуальной внутриигровой экономики [5]. Несмотря на продуманность ручного баланса экономики, он не всегда даёт оптимальный результат. Для подтверждения этого тезиса рассмотрим агрегированные данные из отчетов MER. В качестве количественного показателя экономической стабильности возьмем чистый денежный поток (Net ISK Delta, где ISK — название внутриигровой валюты). Он отражает разницу между всеми «кранами» и «раковинами» и напрямую демонстрирует



Обработанная таблица НОВОГО ФОРМАТА сохранена в: C:\EVE_MER_Project_Data\processed_daily_isk_flows_pivot_NEW_FORMAT.csv

Рис. 1. Динамика показателя Net ISK Delta в EVE Online с 2021 по 2024 год. Несмотря на приближение к нулевому балансу, наблюдаются пиковые значения

тенденции роста или сокращения общей денежной массы в игре. На основе данных MER был построен временной ряд показателя Net ISK Delta в период с 2021 по 2024 год (см. рис. 1).

Net ISK Delta в основном держится около нуля или немного выше, что является более устойчивым состоянием, чем доминанция выраженных инфляционных и дефляционных трендов. Однако экономика остаётся неустойчивой, о чем свидетельствует наличие множественных экстремальных пиковых значений на графике, когда денежная масса стремительно увеличивается или сокращается под воздействием внутриигровых событий. Например, отрицательное пиковое значение в апреле 2022 года совпадает по времени с последствиями глобального военного конфликта («World War Bee 2») [6]. В июле 2021 года разработчики провели заключительный этап ликвидации устаревших космических станций игроков и заменили их на новую систему, при этом проведя программу компенсации. В результате игроки стали массово продавать компенсационные предметы, что привело к вливанию триллионов ISK в экономику EVE. Этот случай — пример экзогенного экономического шока, который также зафиксирован на официальном графике MER, представленном разработчиками (см. рис. 2).

Резюмируя проведенный анализ, даже в относительно стабильный период, экономика подвержена резким шокам, на которые ручное управление не всегда способ-

но среагировать. Предполагаемая RL-система призвана решить эту проблему путем динамической адаптации экономических параметров, обеспечивая немедленную реакцию на любые предпосылки дестабилизации экономических потоков внутри игры.

Динамическое регулирование экономики представляет собой Марковский процесс принятия решений, определяемый кортежем S, A, P, R, γ , где S — пространство состояний, A — пространство действий, P — функция вероятностей перехода, R — функция вознаграждения, γ — коэффициент дисконтирования [7]. В рассматриваемой экономической среде:

- Состояние определяется как $s_t \in S$ и включает в себя всю историю показателя Net ISK Delta (d_t, d_{t-1}).
- Действие определяется как $a_t \in A$ и определяет величины изменений экономических параметров.
- Функция перехода определяется как $P(s_{t+1} | s_t, a_t)$ и описывает динамику системы, учитывая стохастичность среды. Net ISK Delta моделируется как стохастический авторегрессионный процесс:

$$d_{t+1} = \alpha \cdot d_t - \beta \cdot f(a_t) + \epsilon_t \quad (1)$$

где α — коэффициент инерции, β — вектор эффективности, а ϵ_t — случайный шум ($\epsilon_t \sim N(0, \sigma^2)$).

- Функция вознаграждения определяется как R_t и призвана стабилизировать экономику, обеспечивая плавность регулирования:

Top 10 Sinks and Faucets Over Time

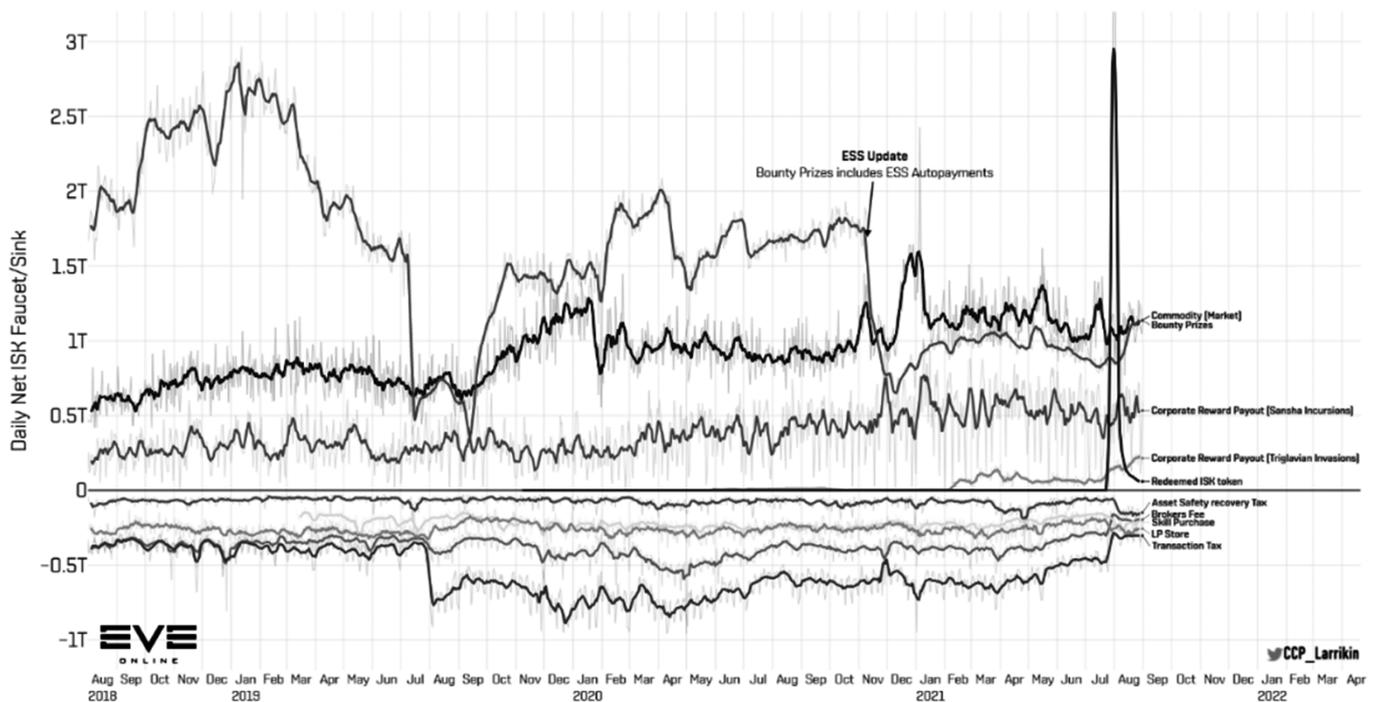


Рис. 2. График динамики денежных масс. Черный пик вверх на графике отражает резкое вливание новой валюты в экономику после обновления в июле 2021 года

$$R_t = w_d \cdot \exp(-k_d \cdot |d_{t+1}|) - w_a \cdot \|a_t - a_{t-1}\|^2 \quad (2)$$

Цель RL-агента — найти оптимальную политику $\pi^*(a|s)$, максимизирующую ожидаемое дисконтированное вознаграждение $G_t = \sum \gamma^k \cdot R_{t+k+1}$. Фундаментом для нахождения такой политики служит уравнение оптимальности Беллмана:

$$Q^*(s, a) = E_{s \sim p} [R(s, a, s') + \gamma \cdot \max_{a'} Q^*(s', a')] \quad (3)$$

Из-за непрерывности пространств состояний и действий аналитическое решение уравнения оптимальности Беллмана в данном случае не представляется возможным, однако нахождение оптимальной политики возможно через функциональную аппроксимацию с помощью нейронных сетей. В данном случае агент взаимодействует со средой, описанной уравнениями (1) и (2) и итеративно обновляет веса сетей, чтобы через обучение нейросетевого агента найти численное приближенное решение уравнения (3).

Для реализации задачи разработки RL-системы были использованы современные фреймворки [8] (см. табл. 1). Проект был реализован на языке Python 3.9.

Таблица 1.

Технологический стек проекта

Компонент	Инструмент/Библиотека	Назначение в проекте
Среда моделирования	Gymnasium	Создание среды, стандартизация API
RL-агент	Stable-Baselines3 (PPO)	Реализация, обучение и оценка RL-агента
Deep Learning	PyTorch	Нейросетевой бэкэнд для Stable-Baselines3
Работа с данными	Pandas, NumPy	Обработка временных рядов
Визуализация	Matplotlib, Seaborn	Построение графиков для представления результатов

Стратегия агента (ppo_eve_econ_500000.zip)

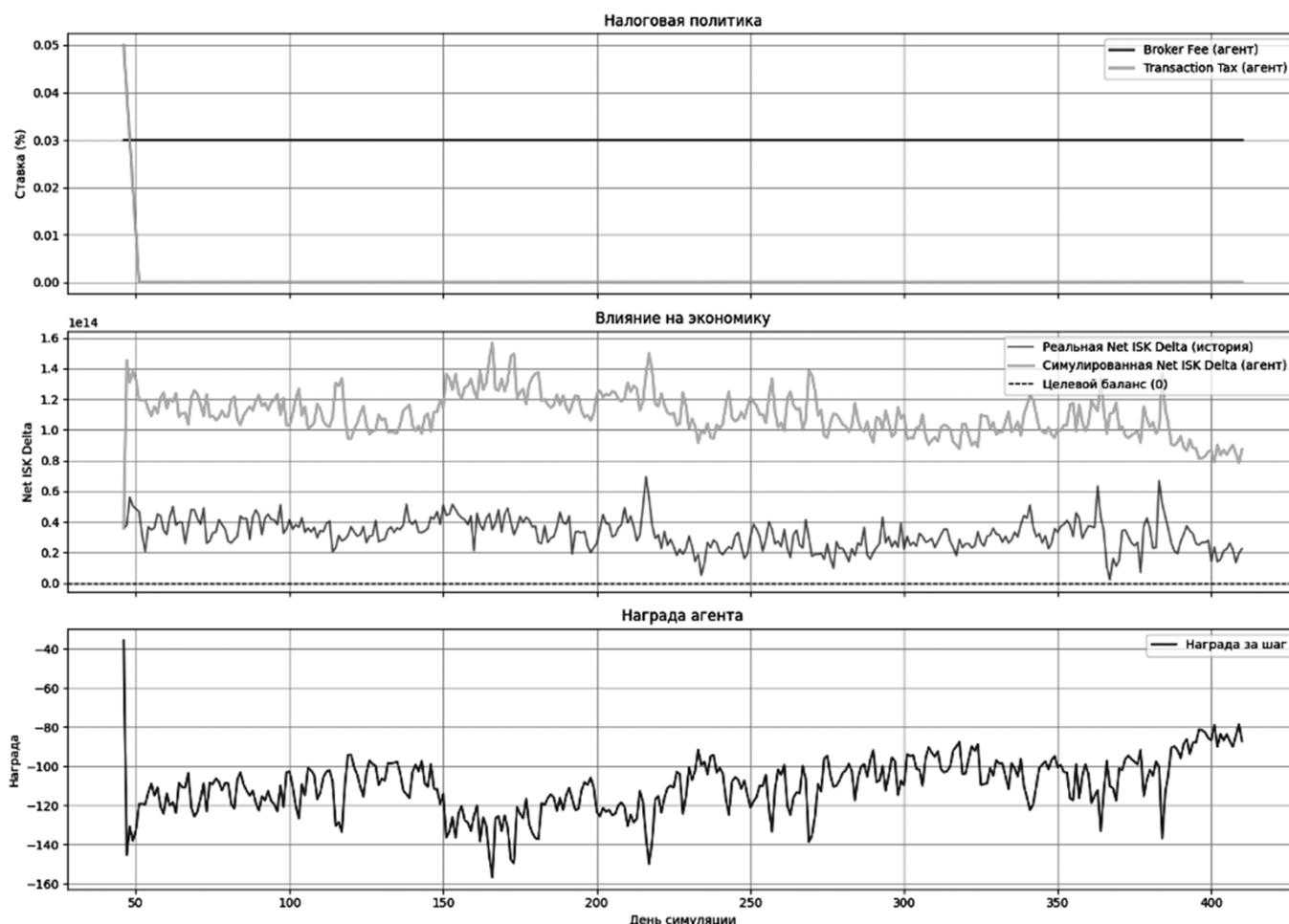


Рис. 3. Первая итерация RL-агента (PPO). Темно-серая линия на среднем графике соответствует реальным данным, светло-серая — данным полученным в результате симуляции

В качестве алгоритма обучения в первой итерации RL-агента был выбран PPO [9], цель которого заключалась в регуляции налоговых ставок на транзакции для снижения инфляции, однако это привело к противоположному результату (см. рис. 3). Агент научился симулировать Net ISK Delta на основе реальных исторических данных, но постоянно выбирал снижение налоговой ставки как оптимальную стратегию, что способствовало дальнейшему усилению инфляционных процессов.

В процессе тестирования новых итераций агента были выявлены две основные проблемы данного этапа разработки — недостаточная сложность экономической модели и избыточно высокие штрафы за апробацию разных действий при обучении. Для достижения оптимального уровня налогообложения экономической движок среды был переписан с учетом закона Кривой Лаффера. Также алгоритм PPO был заменен на SAC (Soft Actor-Critic), ввиду его больше пригодности для обеспечения плавной настройки в непрерывном пространстве действий [10]. В результате была получена новая тестовая итерация, которая продемонстрировала успешное решение задачи снижения инфляции (см. рисунок 4).

Основной проблемой данной итерации является недостаточная сложность механизма регуляции — в EVE Online нет такого понятия как «единый налог», поскольку регуляция денежных масс осуществляется через большое количество вариаций налоговых ставок. С целью повышения практической значимости разрабатываемой системы были введены дифференцированные налоги на основе реальных данных из отчетов MER:

1. `market_tax_multiplier` — действие, регулирующее одновременно две основных налоговые ставки (Transaction Tax и Brokers Fee), «раковина» для денежных масс.
2. `bounty_payout_multiplier` — главный инструмент монетарной политики, контроль размера наград за выполнение заданий, «кран» для денежных масс.
3. `direct_intervention` — прямой контроль денежной массы при возникновении экстремальных шоков, диапазон [-1.0, 1.0]

Новая версия RL-агента успешно справилась с задачей динамического регулирования экономики (см. рис. 5)

Разработанный агент продемонстрировал способность стабильно удерживать Net ISK Delta около целевого

Стратегия агента (sac_eve_econ_final_500000.zip)

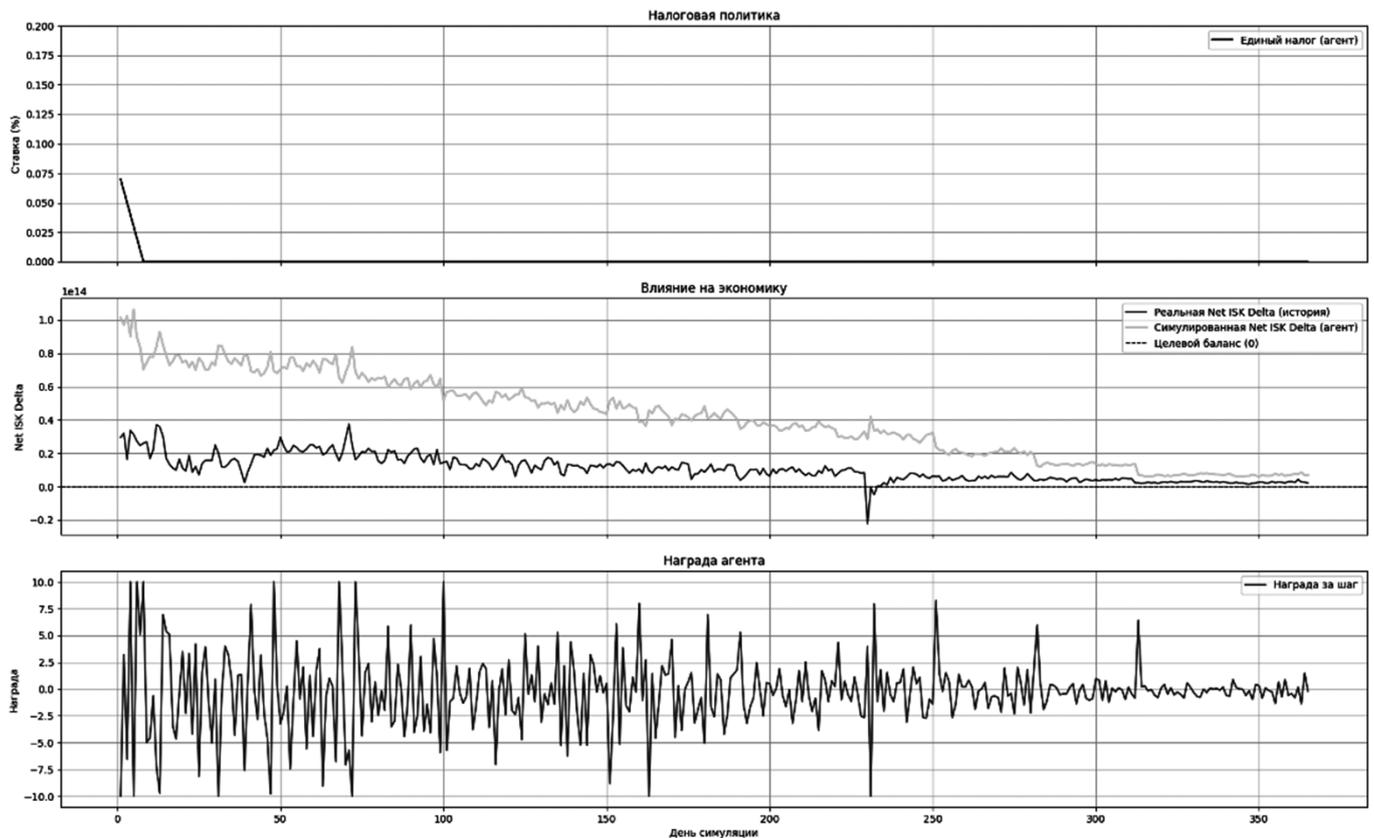


Рис. 4. Вторая итерация RL-агента (SAC). Темно-серая линия на среднем графике соответствует реальным данным, светло-серая — данным полученным в результате симуляции

Результаты Работы RL-Агента (v2) по Управлению Экономикой

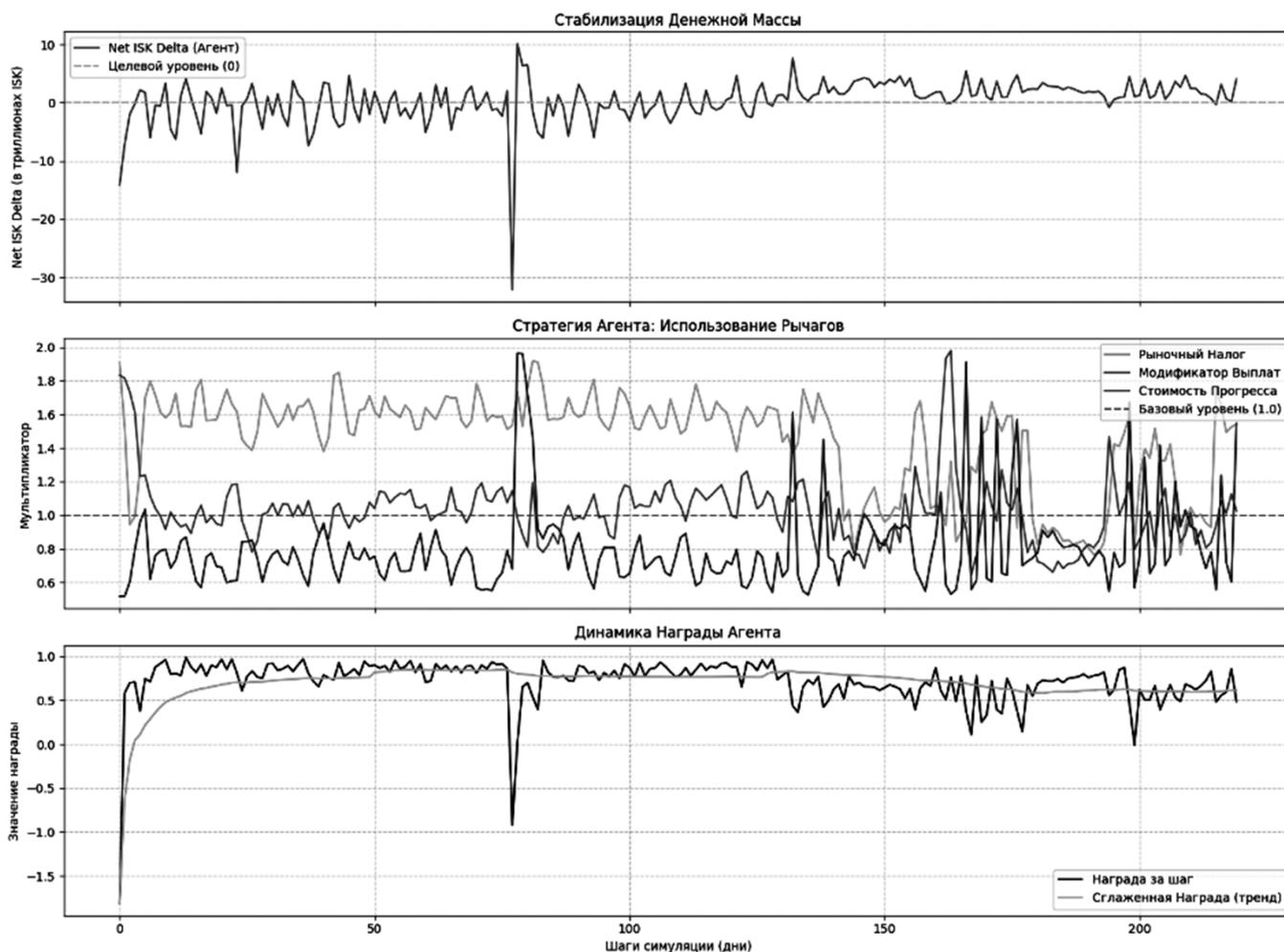


Рис. 5. Новая версия RL-агента. Темно-серая линия на верхнем графике отражает изменение Net ISK Delta

значения, а также оперативно реагировать на кризисы — на графике выше видно, как агент успешно скорректировал дефляционный скачок в краткий срок. В процессе обучения RL-агент принял решение установить на постоянной основе высокие налоги при значительном сокращении выплат игрокам, что в долгосрочной перспективе игрового процесса, вероятно, приведет к сокращению пользовательской базы. Чтобы исправить данную проблему, в функцию награды при обучении модели был добавлен новый компонент — штраф за существенное отклонение параметров регулирования от базовых значений. Для достижения стабильной и прозрачной экономики был также введен штраф за резкие изменения значений при принятии решений RL-агентом (см. рис. 6).

Обновленная версия RL-агента успешно поддерживает объем денежных масс около целевого значения, эффективно справляется с шоками и обеспечивает высокий уровень прозрачности для игроков. Налоговые ставки стали более предсказуемы и всегда поддерживаются

на стабильном уровне, что позволяет игрокам строить свои бизнес-модели вокруг данного факта и минимизирует для них риски, связанные с резкими изменениями. Расходы на игровую прогрессию поддерживаются на одном и том же уровне, но могут быть резко увеличены при реакции на кризисную ситуацию, выступая как инструмент экстренного реагирования. Регулирование наград используется для тонкой настройки, компенсируя мелкие отклонения для поддержания основной политики агента. В итоге финальная версия RL-агента успешно разделяет инструменты настройки экономики и экстренно реагирует на кризисы, динамически выполняет логичные и предсказуемые действия по успешной стабилизации объемов денежных масс, а также создает интересный и живой игровой процесс для всех участников виртуальной экономики внутри игры.

Результаты исследований

В результате исследований были получены следующие результаты:

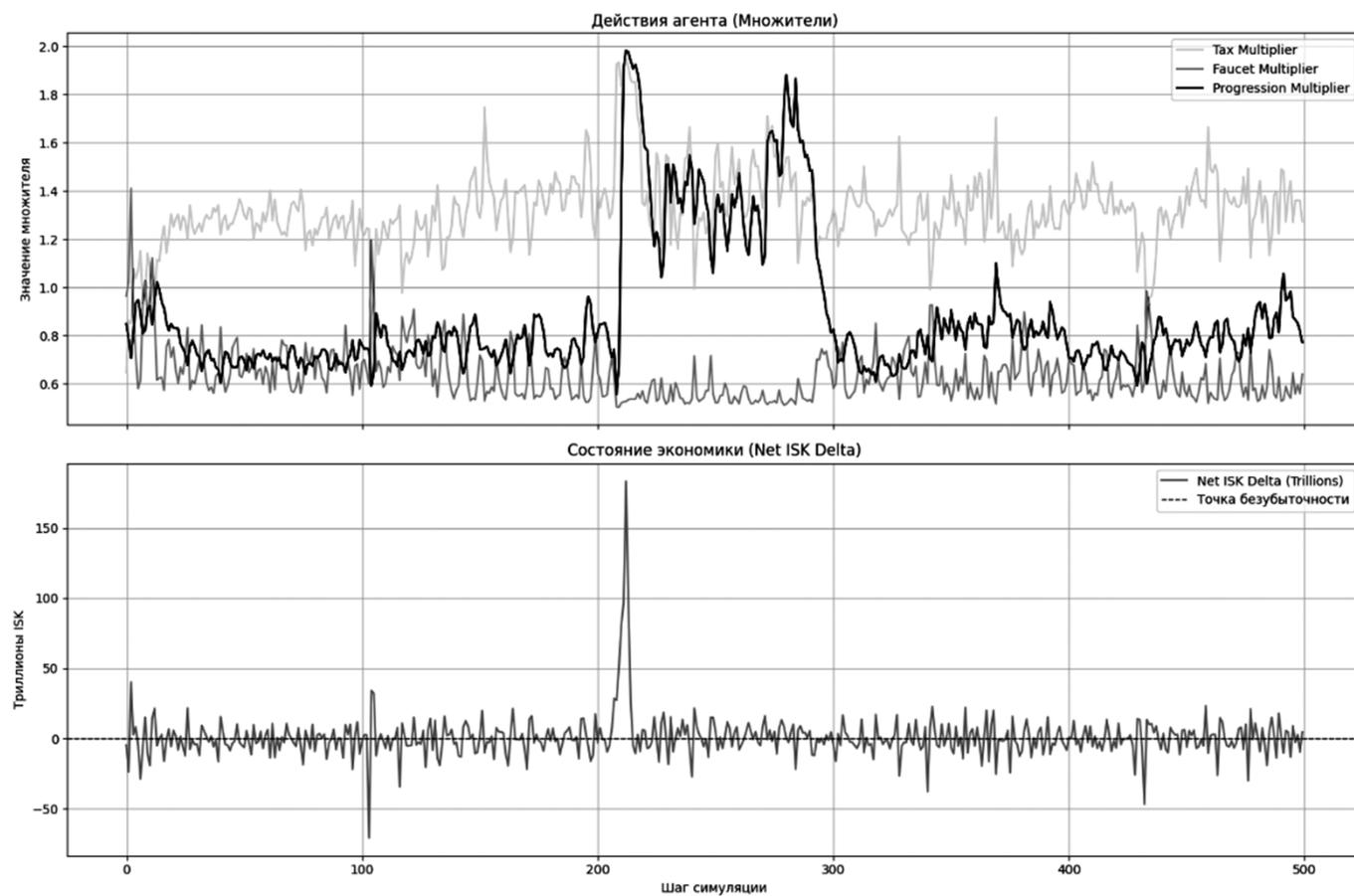


Рис. 6. Финальная итерация RL-агента. Верхний график отражает действия агента в разные промежутки времени

- Проведен анализ экономической системы EVE Online, выявлены основные проблемы с её регулированием.
- Разработана математическая модель виртуальной экономической среды, послужившая основой для обучения RL-агента, предназначенного для регулирования экономики.
- Создан прототип программного комплекса для динамического регулирования экономических потоков в виртуальной экономике и продемонстрирована эффективность его использования.

Заключение

В рамках научно-исследовательской работы был разработан прототип программного комплекса динамического регулирования экономических потоков в виртуальной экономике. В ходе работы проведен анализ экономической системы EVE Online, разработана математическая модель виртуальной экономической среды, на основе которой был обучен RL-агент по регулированию экономики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lehdonvirta V., Castronova E. Virtual Economies: Design and Analysis. — Cambridge: The MIT Press, 2014. — P. 9–12
2. «Легенда, рожденная из хаоса» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/7325460/> (дата обращения: 22.06.2025).
3. Castronova E. Exodus to the virtual world. — St. Martin's Press, 2007
4. «Sinks & Faucets: Lessons on Designing Effective Virtual Game Economies» [Электронный ресурс]. URL: <https://medium.com/1kxnetwork/sinks-faucets-lessons-on-designing-effective-virtual-game-economies-c8daf6b88d05/> (дата обращения: 25.06.2025)
5. CCP Games. Monthly Economic Reports [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eveonline.com/news/t/monthly-economic-reports/> (дата обращения: 28.06.2025)
6. «World War Bee 2 A beginner's guide to EVE Online's epic inter-player war» [Электронный ресурс]. URL: <https://tag.n.wordpress.com/wp-content/uploads/2022/02/world-war-bee-2-brief-final.pdf/> (дата обращения: 01.07.2025)
7. Sutton R.S., Barto A.G. Reinforcement learning: An introduction. MIT press, 2015. — P.53–80
8. Raffin A. et al. Stable-baselines3: Reliable reinforcement learning implementations // The Journal of Machine Learning Research. — 2021. — T.22. — №. 1. — С. 1–8.
9. Schulman J., Wolski F., Dhariwal P., Radford A., Klimov O. Proximal policy optimization algorithms // arXiv preprint arXiv:1707.06347. — 2017.
10. Уиндер Ф. Обучение с подкреплением для реальных задач. — СПб.: БХВ-Петербург, 2023. — 400 с.

ВЛИЯНИЕ АНЕСТЕЗИИ И КОМОРБИДНОЙ ПАТОЛОГИИ НА ПОСЛЕОПЕРАЦИОННОЕ ТЕЧЕНИЕ ПАЦИЕНТОВ С КОЛОРЕКТАЛЬНЫМ РАКОМ

EFFECT OF ANESTHESIA AND COMORBID PATHOLOGY ON THE POSTOPERATIVE COURSE OF PATIENTS WITH COLORECTAL CANCER

R. Gilfanova
Z. Afanasyeva

Summary. The aim of this study was to determine the impact of anesthetic tactics, in particular the use of navigation-controlled TAP block with ropivacaine, and comorbid pathology on the course of the early postoperative period in patients who underwent surgery for colorectal cancer. The prospective study involved 106 patients divided into groups with and without TAP block. The severity of pain, the need for analgesics, the restoration of gastrointestinal motility and the duration of hospitalization were assessed depending on the Charlson comorbidity index and the presence of specific comorbidities. The results showed that TAP block helps reduce pain, decrease the opioid load, accelerate functional recovery and potentially reduce the duration of hospitalization. The most pronounced positive effect was noted in patients with high somatic burden. These data support the advisability of including TAP block in ERAS protocols in comorbid patients with colorectal cancer.

Keywords: colorectal cancer, TAP block, regional anesthesia, postoperative period, comorbidity.

Гильфанова Римма Анфисовна

врач-хирург, отделение рентгенохирургических методов диагностики и лечения № 2, ГАУЗ «Республиканская клиническая больница», г. Казань
rimma-gilfanova@mail.ru

Афанасьева Зинаида Александровна

Профессор, ГБОУ ДПО «Казанская государственная медицинская академия»
z-afanasieva@mail.ru

Аннотация. Целью данного исследования явилось определение влияния анестезиологической тактики, в частности применения навигационно-контролируемой поперечно-плоскостная блокада живота (transversus abdominis plane block, TAP-блокада) ропивакаином, и коморбидной патологии на течение раннего послеоперационного периода у пациентов, перенёвших хирургическое лечение по поводу колоректального рака. В проспективном исследовании приняли участие 106 пациентов, разделённых на группы с TAP-блокадой и без неё. Оценивались выраженность болевого синдрома, потребность в анальгетиках, восстановление моторики желудочно-кишечного тракта и длительность госпитализации в зависимости от индекса коморбидности Чарлсона и наличия специфических сопутствующих заболеваний. Результаты показали, что TAP-блокада способствует снижению боли, уменьшению опиоидной нагрузки, ускорению функционального восстановления и потенциальному сокращению сроков госпитализации. Наиболее выраженное положительное влияние было отмечено у пациентов с высокой соматической отягощённостью. Эти данные подтверждают целесообразность включения TAP-блокады в состав протокол ускоренного восстановления после хирургических операций (Enhanced Recovery After Surgery, ERAS) у коморбидных пациентов с колоректальным раком.

Ключевые слова: колоректальный рак, TAP-блокада, регионарная анестезия, послеоперационный период, коморбидность.

Введение

Колоректальный рак (КРР) является одним из наиболее распространённых злокачественных новообразований в мире. По данным глобальной онкологической статистики, он занимает третье место по частоте и второе по уровню смертности от всех онкологических заболеваний [1, 2]. В России ежегодно регистрируется более 60 тысяч новых случаев КРР, что составляет значимую долю в структуре онкозаболеваемости и смертности [3].

Современная парадигма хирургического лечения КРР ориентирована на минимизацию послеопераци-

онных осложнений и ускоренное восстановление пациента. При этом адекватный контроль болевого синдрома в послеоперационном периоде приобретает первостепенное значение. Некачественное обезболивание способствует усилению стресса, иммуносупрессии, замедлению моторики кишечника и увеличивает риск формирования хронического болевого синдрома [4, 5]. Более того, опиоиды, традиционно используемые для купирования боли, могут негативно влиять на противоопухолевый иммунный ответ [6, 7].

Учитывая коморбидный статус большинства пациентов пожилого возраста с КРР, роль коморбидности в прогнозе послеоперационного восстановления вы-

ходит на первый план. Установлено, что наличие хронической обструктивной болезни лёгких и фибрилляции предсердий достоверно увеличивает риск осложнений после хирургии КРР. Так, наличие фибрилляции предсердий увеличивает риск тяжёлых послеоперационных осложнений почти в 3 раза (OR 2.70; 95 % CI 1.53–4.89), а хроническая обструктивная болезнь лёгких — в 2 раза (OR 2.02; 95 % CI 1.07–3.80) [8], высокая суммарная коморбидная нагрузка ухудшает показатели выживаемости даже при проведении адъювантной терапии [9].

У пожилых пациентов с КРР риск послеоперационных осложнений во многом определяется не возрастом как таковым, а сопутствующей патологией. По данным многоцентрового исследования в Нидерландах, увеличение возраста (≥ 75 лет) ассоциировано с ростом неоперационных осложнений, тогда как частота хирургических осложнений оставалась стабильной [10]. Это подтверждается результатами ретроспективного исследования Turri и соавт. (2022), где показано, что коморбидность значительно увеличивает риск послеоперационных осложнений и снижает общую выживаемость, тогда как рак-специфическая выживаемость оставалась стабильной у пациентов с ранними стадиями заболевания [11].

Коморбидные состояния существенно влияют и на отдаленные исходы при КРР. Согласно данным REDISEC-CARESS/CCR, заболевания сердечно-сосудистой, дыхательной и метаболической систем, а также деменция ассоциированы с повышением смертности и осложнений в течение 5 лет после операции [12].

В связи с этим, особую актуальность приобретает внедрение мультимодальной анальгезии и регионарных методов обезболивания, включая ТАР-блокаду, как эффективной и безопасной альтернативы системному применению опиоидов [13, 14]. ТАР-блокада, основанная на введении местного анестетика в анатомическую плоскость между внутренней косой и поперечной мышцами живота, позволяет избирательно блокировать ноцицептивную импульсацию от передней брюшной стенки, снижая уровень боли и опиоидной нагрузки [15, 16].

В рамках концепции ERAS-протоколов ТАР-блокада демонстрирует способность улучшать клинические исходы — ускоряет восстановление моторики кишечника, сокращает сроки госпитализации и уменьшает частоту побочных эффектов [17, 18]. Это особенно важно в условиях коморбидной отягощенности, при которой минимизация фармакологических нагрузок и оперативная реабилитация становятся ключевыми задачами.

Таким образом, изучение влияния методов анестезиологического обеспечения, в частности ТАР-блокады, на течение послеоперационного периода у пациентов с КРР и сопутствующими заболеваниями, представляет своевременным и практически значимым.

Цель статьи — оценить влияние применения навигационно-контролируемой ТАР-блокады, и выраженности коморбидной патологии на течение раннего послеоперационного периода и клинические исходы у пациентов, перенёвших хирургическое лечение по поводу КРР.

Материалы и методы

Исследование имело проспективный характер и проводилось на базе специализированного онкологического учреждения. В исследование включено 106 пациентов, перенесших хирургическое лечение по поводу КРР. Пациенты были разделены на две группы, сопоставимые по полу, возрасту, стадии опухолевого процесса, индексу массы тела, сопутствующей патологии и уровню коморбидной нагрузки по индексу Чарлсона.

Группа наблюдения ($n=53$) — пациенты, получившие навигационно-контролируемую ТАР-блокаду ропивакаином в составе мультимодальной анальгезии. Группа сравнения ($n=53$) — пациенты, получавшие стандартную схему анальгезии (опиоидные и нестероидные анальгетики без регионарной блокады).

Критерии включения — возраст 55–70 лет, плановая операция по поводу морфологически верифицированного КРР, добровольное информированное согласие на участие в исследовании. Критерии исключения — аллергия на местные анестетики, неконтролируемые хронические заболевания (печёночная, почечная недостаточность, декомпенсированная ИБС), когнитивные нарушения, препятствующие участию в исследовании.

Методы обезболивания. ТАР-блокада выполнялась под контролем УЗИ с использованием 0,375 % раствора ропивакаина (по 20 мл с каждой стороны). Стандартная анальгезия включала трамадол, кеторолак и, при необходимости, морфин или промедол.

Оценка проводилась по следующим шкалам и критериям. ВАШ — визуально-аналоговая шкала боли на 3, 6, 12, 24 и 48 часах после операции. HADS — госпитальная шкала тревоги и депрессии для оценки психоэмоционального состояния до операции. Индекс коморбидности Чарлсона — для количественной оценки сопутствующих заболеваний.

Параметры восстановления — время до появления перистальтики, первого стула, первой мобилизации, самостоятельной ходьбы; длительность госпитализации; потребность в анальгетиках: суточные дозы трамадола, кеторолака, опиоидов.

Побочные эффекты — гипотония, тошнота, рвота, инфекционные осложнения.

Лабораторные маркеры — показатели общего и биохимического анализа крови, включая уровни нейтрофилов и СРБ.

Статистическая обработка проводилась с использованием критериев Стьюдента, Манна–Уитни, χ^2 , коэффициента корреляции Пирсона. Уровень статистической значимости установлен на уровне $p < 0,05$. Обработка данных выполнялась с помощью пакетов STATISTICA 6.0 и Microsoft Excel 2016.

Результаты

В результате проведённого исследования установлено, что включение навигационно-контролируемой ТАР-блокады ропивакаином в состав мультимодальной анальгезии достоверно снижало выраженность послеоперационного болевого синдрома. Наиболее значимые различия зафиксированы через 24 часа после операции: медиана ВАШ составила $3,81 \pm 1,40$ баллов в группе наблюдения против $4,58 \pm 1,60$ баллов в группе сравнения ($p = 0,01$), что подтверждает эффективность ТАР-блокады в контроле боли в период её максимальной выраженности. Результаты отражены в таблице №1.

Таблица 1.

Сравнительная оценка динамики ВАШ в исследуемых группах

Показатель	Группа наблюдения, n=53	Группа сравнения, n=53	p*	t**
ВАШ через 3ч, баллы	$4,87 \pm 2,27$	$5,09 \pm 1,69$	0,37	-0,58
ВАШ через 6ч, баллы	$5,28 \pm 1,94$	$5,58 \pm 1,96$	0,42	-0,80
ВАШ через 12ч, баллы	$5,25 \pm 2,16$	$5,40 \pm 1,87$	0,54	-0,38
ВАШ через 24ч, баллы	$3,81 \pm 1,40$	$4,58 \pm 1,60$	0,01	-2,65
ВАШ через 48ч, баллы	$4,53 \pm 1,93$	$5,08 \pm 2,06$	0,17	-1,41

Примечание: p* — уровень статистической значимости; t** — критерий Стьюдента

Достижение выраженного анальгезирующего эффекта ТАР-блокады именно к 24 часам после вмешательства, можно предположить развитием максимального эффекта именно к этому моменту. На 48 часах сохранялась положительная динамика в основной группе, однако статистическая значимость была на границе, что может быть связано с началом стабилизации болевого синдрома в обеих группах.

Кроме того, применение ТАР-блокады сопровождалось статистически значимым снижением потребности в системных анальгетиках. Так, средняя суточная доза трамадола в основной группе была на 25 % ниже по сравнению с контрольной (150 ± 30 мг против

200 ± 40 мг, $p = 0,02$), а кеторолака — на 20% (60 ± 15 мг против 75 ± 20 мг, $p = 0,03$). Использование промедола и морфина также было ограничено преимущественно контрольной группой, что свидетельствует о снижении опиоидной нагрузки и потенциально — частоты связанных с ней побочных эффектов.

У пациентов с высокой коморбидной нагрузкой (индекс Чарлсона >5) выявлена достоверная тенденция к удлинению сроков госпитализации, снижению темпов функционального восстановления и более выраженному нарушению моторики желудочно-кишечного тракта в раннем послеоперационном периоде. Наиболее выраженное влияние на длительность пребывания в стационаре оказывали сосудистые и метаболические заболевания.

Так, наличие в анамнезе острого нарушения мозгового кровообращения (ОНМК) сопровождалось увеличением средней продолжительности госпитализации, что, вероятно, отражает как соматическую отягощённость, так и снижение двигательной активности, когнитивные расстройства и необходимость более длительного постоперационного мониторинга у данной категории больных.

Хронические метаболические нарушения также оказывали негативное влияние на ход реабилитации. При наличии сахарного диабета 2 типа отмечалась тенденция к удлинению госпитализации и замедлению восстановления перистальтики и дефекации. Это может быть связано с микроангиопатическими и неврогенными осложнениями диабета, способствующими нарушению иннервации кишечника и снижению чувствительности к фармакологической стимуляции. Хроническая болезнь почек (ХБП), в свою очередь, ассоциировалась с повышенным риском системного воспалительного ответа, гипергидратации, нарушений электролитного баланса, что также затрудняло раннюю мобилизацию и восстановление функций.

Анализ лабораторных данных подтверждал наличие у этих пациентов более выраженных отклонений в воспалительных маркерах (нейтрофилов, С-реактивного белка), что дополнительно свидетельствует о системной дисфункции и сниженной компенсаторной способности. Кроме того, наблюдалась корреляция между уровнем нейтрофилов и длительностью стационарного лечения, хотя статистическая значимость была ограничена ($r = 0,14$).

Для оценки влияния отдельных коморбидных состояний на длительность госпитализации был проведён стратифицированный анализ по наличию наиболее клинически значимых заболеваний: ОНМК, сахарного диабета 2 типа и ХБП. Расчёт средней продолжительности

стационарного лечения выполнен отдельно для пациентов с указанными патологиями и без них. Результаты статистического сравнения представлены в таблице № 2.

Таблица 2.

Сравнительная характеристика длительности госпитализации пациентов с сопутствующими заболеваниями и без

Сопутствующая патология	Средняя длительность госпитализации, суток	Без патологии, суток	p*
ОНМК	13,25	11,71	0,03
Сахарный диабет	11,91	11,72	0,75
ХБП	12,33	11,71	0,5

Примечание: p* — уровень статистической значимости

Как видно из представленных данных, только наличие в анамнезе ОНМК достоверно увеличивало среднюю продолжительность госпитализации (на 1,54 суток, $p = 0,03$). Влияние сахарного диабета и ХБП на данный показатель не достигло статистической значимости, однако отмечалась тенденция к удлинению сроков лечения у пациентов с хронической почечной недостаточностью. Полученные результаты подчёркивают значимость цереброваскулярной патологии как фактора риска неблагоприятного течения послеоперационного периода у пациентов с КРР и обосновывают необходимость более интенсивного мониторинга и ранней реабилитации в данной подгруппе.

Наличие выраженной коморбидной патологии оказывает мультифакторное негативное влияние на течение послеоперационного периода, увеличивая как продолжительность госпитализации, так и сроки восстановления моторно-эвакуаторной функции кишечника. Это подчёркивает необходимость более тщательной оценки риска и персонализации ведения таких пациентов в рамках мультимодальных протоколов послеоперационной терапии.

Применение навигационно-контролируемой ТАР-блокады у пациентов с выраженной коморбидной отягощённостью продемонстрировало способность частично нивелировать негативное влияние сопутствующих заболеваний на течение раннего послеоперационного периода. Анализ данных показал, что несмотря на сопоставимый уровень индекса коморбидности Чарлсона (в основной группе — $4,72 \pm 3,12$ против $5,45 \pm 3,02$, $p = 0,22$), пациенты, получавшие ТАР-блокаду, характеризовались более благоприятной клинической динамикой.

В частности, у данной категории больных зафиксировано достоверно более быстрое восстановление моторно-эвакуаторной функции кишечника: средний срок появления перистальтики составил $3,70 \pm 1,07$ суток

против $4,83 \pm 0,91$ суток в группе стандартной анальгезии ($p < 0,001$), а время до первого стула — $4,06 \pm 0,69$ против $5,15 \pm 0,84$ суток соответственно ($p < 0,001$). Аналогично, темпы мобилизации были значительно выше: пациенты группы наблюдения начинали активное вертикализирование в среднем через 18 ± 5 часов после операции, в то время как в контрольной группе этот показатель составлял 26 ± 6 часов ($p < 0,001$). Время до начала самостоятельной ходьбы также было существенно короче (36 ± 8 против 48 ± 10 часов, $p < 0,001$).

Несмотря на то, что средняя длительность госпитализации в группе наблюдения была меньше ($11,42 \pm 3,03$ суток против $12,11 \pm 2,97$ суток в контрольной), статистическая значимость данного различия не была достигнута ($p = 0,13$). Однако отмечаемая положительная тенденция в совокупности с другими клиническими параметрами указывает на потенциальный вклад ТАР-блокады в ускорение общей реабилитации.

Важным преимуществом ТАР-блокады, особенно в условиях выраженной соматической отягощённости, стала возможность снижения потребности в системных опиоидах. В группе, получавшей ТАР-блокаду, количество пациентов с опиоид-ассоциированными побочными эффектами (тошнота, рвота, гипотония, седация) было минимальным — 1,9 % против 7,5 % в группе сравнения. Это, в свою очередь, снижало частоту осложнений, удлиняющих стационарное лечение, и повышало общий уровень комфорта пациентов.

Таким образом, включение ТАР-блокады в состав мультимодального обезболивания у пациентов с коморбидным статусом не только эффективно снижает болевой синдром, но и способствует более быстрому восстановлению физиологических функций, снижению частоты осложнений и потенциальному сокращению сроков госпитализации, что делает её предпочтительным выбором в клинической практике при колоректальной хирургии.

Обсуждение

Полученные данные подтверждают высокую клиническую эффективность ТАР-блокады в снижении выраженности послеоперационного болевого синдрома и ускорении функционального восстановления у пациентов, перенесших хирургическое лечение по поводу КРР. Наши результаты согласуются с выводами ранее опубликованных международных работ.

Так, в метаанализе Abdallah и соавт. (2012) показано, что ТАР-блокада достоверно снижает интенсивность боли в первые 24–48 часов после лапаротомий и лапароскопических вмешательств на органах брюшной полости, а также существенно уменьшает потребность

в опиоидах в послеоперационном периоде [14]. Подобные результаты демонстрирует и рандомизированное исследование Hain и др. (2018), в котором ТАР-блокада ропивакаином способствовала снижению частоты урологических и моторных осложнений после колэктомии, а также уменьшала выраженность тошноты и рвоты на фоне отказа от опиоидной анальгезии [16].

Особое значение результаты настоящего исследования приобретают в контексте ведения пациентов с выраженной коморбидной патологией. Учитывая распространённость сердечно-сосудистых (гипертония, ишемическая болезнь сердца, ХСН) и метаболических нарушений (сахарный диабет 2 типа, ожирение) среди онкологических пациентов старшего возраста, минимизация опиоидной нагрузки и лекарственного взаимодействия становится критически важной задачей. Наши данные демонстрируют, что ТАР-блокада позволяет достичь эффективного обезболивания без значимого увеличения частоты побочных эффектов даже у больных с ограниченными функциональными резервами.

Индивидуализация анальгезии, основанная на стратификации риска и учёте фоновых заболеваний, становится неотъемлемой частью мультимодального подхода в рамках ERAS-протоколов [18]. У пациентов с высоким индексом коморбидности, где применение стандартных схем системного обезболивания сопряжено с высоким риском осложнений, ТАР-блокада под УЗ-навигацией предоставляет безопасную и контролируруемую альтернативу, что подтверждается как нашими данными, так и результатами ряда зарубежных исследований [13, 15].

Результаты настоящей работы не только подтверждают эффективность ТАР-блокады в клинических условиях, но и подчёркивают её особую ценность в популяции

с высокой соматической отягощённостью. Безопасность, простота выполнения и потенциал снижения лекарственной нагрузки делают ТАР-блокаду важным элементом персонализированной анальгезии в абдоминальной онкохирургии.

Заключение

Результаты проведённого исследования убедительно демонстрируют, что тактика анестезиологического обеспечения с включением навигационно-контролируемой ТАР-блокады ропивакаином обладает значительным потенциалом для улучшения послеоперационного течения у пациентов с КРПКОЛ, особенно при наличии выраженной коморбидной патологии. ТАР-блокада обеспечивает более эффективный контроль болевого синдрома, позволяет снизить опиоидную нагрузку, ускоряет восстановление моторики желудочно-кишечного тракта и способствует более ранней мобилизации пациентов.

Коморбидные состояния, в частности сердечно-сосудистые, метаболические и цереброваскулярные заболевания, оказывают значительное негативное влияние на продолжительность госпитализации и функциональное восстановление. Тем не менее, применение регионарной анестезии способно частично нивелировать эти неблагоприятные эффекты, обеспечивая более благоприятное течение раннего послеоперационного периода.

Полученные данные подтверждают необходимость включения методов регионарной анальгезии, в частности ТАР-блокады, в стандартизированные ERAS-протоколы и клинические рекомендации по ведению пациентов с КРП, особенно в популяции с высокой соматической отягощённостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Siegel R.L., Miller K.D., Jemal A. Cancer statistics, 2019 // *CA: A Cancer Journal for Clinicians*. — 2019. — Vol. 69, No. 1. — P. 7–34.
2. Sung H., Ferlay J., Siegel R.L., Laversanne M., Soerjomataram I., Jemal A., Bray F. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries // *CA Cancer J Clin*. — 2021. — Vol. 71, No. 3. — P. 209–249.
3. Злокачественные новообразования в России в 2023 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой. — Москва: МНИОИ им. П.А. Герцена — филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2024. — 276 с.: ил. — ISBN 978-5-85502-298-8.
4. Treede R.D., Rief W., Barke A. et al. Chronic pain as a symptom or a disease: the IASP Classification of Chronic Pain for the ICD-11 // *Pain*. — 2019. — Vol. 160, No. 1. — P. 19–27.
5. Ji R.R., Nackley A., Huh Y., Terrando N., Maixner W. Neuroinflammation and central sensitization in chronic and widespread pain // *Anesthesiology*. — 2018. — Vol. 129, No. 2. — P. 343–366.
6. Angka L., Martel A.B., Kilgour M., Jeong A., Sadiq M., de Souza C.T., Kennedy M.A., Auer R.C. Natural killer cell IFN γ secretion is suppressed by endogenous opioids in cancer patients // *Front Immunol*. — 2018. — Vol. 9. — Article 3147.
7. Franchi S., Moschetti G., Amodeo G., Sacerdote P. Do animal models of pain predict analgesic efficacy in humans? // *Pharmacological Research*. — 2019. — Vol. 140. — P. 90–104.
8. Flynn D.E., Mao D., Yerkovich S.T., Franz R., Iswariah H., Hughes A., Shaw I.M., Tam D.P.L., Chandrasegaram M.D. The impact of comorbidities on post-operative complications following colorectal cancer surgery // *PLoS One*. — 2020. — Vol. 15, No. 12. — e0243995. — DOI: 10.1371/journal.pone.0243995.
9. Stavrou E.P., Lu C.Y., Buckley N., Pearson S. The role of comorbidities on the uptake of systemic treatment and 3-year survival in older cancer patients // *Annals of Oncology*. — 2012. — Vol. 23, No. 9. — P. 2422–2428. — DOI: 10.1093/annonc/mdr618.

10. van der Hulst HC, van der Bol JM, Bastiaannet E, Portielje JEA, Dekker JWT. Surgical and non-surgical complications after colorectal cancer surgery in older patients; time-trends and age-specific differences // *European Journal of Surgical Oncology*. 2023. Vol. 49, № 4. P. 724–729. DOI: 10.1016/j.ejso.2022.11.095. PMID: 36635163.
11. Turri G., Caliskan G., Conti C., Martinelli L., De Giulio E., Ruzzenente A., Guglielmi A., Verlato G., Pedrazzani C. Impact of age and comorbidities on short- and long-term outcomes of patients undergoing surgery for colorectal cancer // *Frontiers in Oncology*. — 2022. — Vol. 12. — Article 959650. — DOI: 10.3389/fonc.2022.959650.
12. Quintana JM, Anton-Ladislao A, Lázaro S, Gonzalez N, Bare M, Fernandez-de-Larrea N, Redondo M, Escobar A, Sarasqueta C, Garcia-Gutierrez S, Aguirre U; REDISSEC-CARESS/CCR group. Effect of comorbidities on long-term outcomes of colorectal cancer patients // *European Journal of Cancer Care (English edition)*. 2022. Vol. 31, № 2. e13561. DOI: 10.1111/ecc.13561. PMID: 35174571.
13. Chin K.J., Mariano E.R. Interfascial plane blocks: a review of anatomy and techniques // *Korean J Anesthesiol*. — 2021. — Vol. 74, No. 5. — P. 292–307.
14. Abdallah F.W., Chan V.W.S., Brull R. Transversus abdominis plane block: a systematic review // *Reg Anesth Pain Med*. — 2012. — Vol. 37, No. 2. — P. 193–209.
15. Aveline C., Le Hetet H., Le Roux A., Vautier P., Cognet F., Laloë P.A. Comparison between spinal anesthesia and TAP block for postoperative pain management after inguinal hernia repair // *Br J Anaesth*. — 2011. — Vol. 106, No. 5. — P. 709–715.
16. Hain E., Maggiori L., Manceau G., Mongin C., Prost A. L., Panis Y. Effect of Transversus Abdominis Plane Block with Ropivacaine on Postoperative Urinary Retention After Colectomy: A Randomized Controlled Trial // *Dis Colon Rectum*. — 2018. — Vol. 61, No. 1. — P. 74–81.
17. Bakker N., Cakir H., Doodeman H.J., Moelker A., Houdijk A.P.J. Eight years of experience with enhanced recovery after surgery in patients with colon cancer: impact of measures to improve adherence // *Surgery*. — 2015. — Vol. 157, No. 6. — P. 1130–1136.
18. Kehlet H., Wilmore D.W. Evidence-based surgical care and the evolution of fast-track surgery // *Ann Surg*. — 2008. — Vol. 248, No. 2. — P. 189–198.

© Гильфанова Римма Анфисовна (rimma-gilfanova@mail.ru); Афанасьева Зинаида Александровна (z-afanasieva@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

КОМОРБИДНОСТЬ КАК ФАКТОР РИСКА: ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ ПАЦИЕНТОВ С КОЛОРЕКТАЛЬНЫМ РАКОМ ПОСЛЕ ОПЕРАЦИЙ

COMORBIDITY AS A RISK FACTOR: CONSEQUENCES FOR PATIENTS WITH COLORECTAL CANCER AFTER SURGERY

R. Gilfanova
Z. Afanasyeva
R. Gilfanova
M. Ziganshin

Summary. The aim of the study was to evaluate the impact of comorbidities on the course of the postoperative period in patients who underwent surgery for colorectal cancer (CRC). The study included 106 patients, in whom the duration of hospitalization, recovery of intestinal motility, severity of the inflammatory response and the presence of comorbid conditions such as arterial hypertension, type 2 diabetes mellitus, chronic kidney disease, chronic heart failure and acute cerebrovascular accident were analyzed. A significant increase in the duration of hospitalization was found in patients with stroke. Patients with metabolic disorders and CKD tended to have a slower recovery and an increased inflammatory response. The data obtained emphasize the need for an individualized approach to postoperative care of patients with CRC, taking into account the degree and nature of comorbidity.

Keywords: colorectal cancer, comorbidity, postoperative period, comorbidities, rehabilitation.

Гильфанова Римма Анфисовна
врач-хирург, отделение рентгенохирургических
методов диагностики и лечения № 2,
ГАУЗ «Республиканская клиническая больница», г. Казань
rimma-gilfanova@mail.ru

Афанасьева Зинаида Александровна
Профессор, ГБОУ ДПО «Казанская государственная
медицинская академия», г. Казань
z-afanasieva@mail.ru

Гильфанова Рида Анфисовна
врач-хирург, отделение рентгенохирургических
методов диагностики и лечения № 2, ГАУЗ
«Республиканская клиническая больница», г. Казань
rida-gilfanova@mail.ru

Зиганшин Марат Исмагилович
врач-колопроктолог, заведующий отделением
колопроктологии ГАУЗ «Республиканская клиническая
больница», г. Казань
zigamarat@yandex.ru

Аннотация. Цель исследования — оценить влияние сопутствующих заболеваний на течение послеоперационного периода у пациентов, перенёсших хирургическое лечение по поводу колоректального рака. В исследование включены 106 пациентов, у которых анализировались длительность госпитализации, восстановление кишечной моторики, выраженность воспалительного ответа и наличие коморбидных состояний, таких как артериальная гипертензия, сахарный диабет 2 типа, хроническая болезнь почек, хроническая сердечная недостаточность и острое нарушение мозгового кровообращения. Достоверное увеличение сроков госпитализации выявлено у пациентов с ОНМК. У больных с метаболическими нарушениями и ХБП отмечалась тенденция к замедленному восстановлению и усиленному воспалительному ответу. Полученные данные подчёркивают необходимость индивидуализированного подхода к послеоперационному ведению больных с колоректальным раком с учётом степени и характера коморбидности.

Ключевые слова: колоректальный рак, коморбидность, послеоперационный период, сопутствующие заболевания, реабилитация.

Введение

Колоректальный рак (КРР) остаётся одним из ведущих онкологических заболеваний по заболеваемости и смертности. Согласно международной онкологической статистике, он занимает третье место по распространённости и второе — по показателям смертности среди всех онкологических заболеваний [1, 2]. В Российской Федерации ежегодно выявляется свы-

ше 60 тысяч новых случаев КРР, что делает его одним из ведущих факторов, определяющих структуру онкологической заболеваемости и летальности [3].

Современная стратегия лечения ориентирована на минимизацию осложнений и ускоренную реабилитацию. Однако, пациенты старших возрастных групп, составляющие основную когортную массу больных КРР, часто имеют сопутствующие заболевания, такие как ар-

териальная гипертензия, сахарный диабет, ишемическая болезнь сердца, хроническая обструктивная болезнь лёгких и цереброваскулярная патология. Это обстоятельство существенно влияет как на выбор анестезиологической тактики, так и на общий объём хирургического вмешательства и послеоперационное восстановление.

Коморбидность рассматривается как независимый фактор риска при абдоминальных вмешательствах, включая онкохирургию. По данным различных исследований, наличие таких состояний, как хроническая обструктивная болезнь лёгких, фибрилляция предсердий, цереброваскулярная патология, диабет и хроническая болезнь почек, достоверно ухудшает течение послеоперационного периода и снижает показатели выживаемости. В частности, фибрилляция предсердий почти втрое увеличивает вероятность серьёзных послеоперационных событий, а наличие ХОБЛ — примерно в два раза [3]. Кроме того, высокий общий уровень коморбидности негативно отражается на выживаемости пациентов, даже несмотря на проведение адьювантной терапии [4].

По мнению Hain и соавт. [5], коморбидный фон, особенно при наличии метаболических и сосудистых нарушений, может замедлять реабилитацию, увеличивать потребность в инвазивной поддержке и повышать риск осложнений. Как отмечают Ekstein и др. [6], даже при лапароскопических вмешательствах у пациентов с сопутствующими заболеваниями интенсивность послеоперационного болевого синдрома может быть выше, чем при открытых операциях у соматически «лёгких» больных. Kim и соавт. [7] подчеркивают, что восстановление моторной функции кишечника и возвращение к самостоятельной активности после хирургии КРР нередко затягивается именно у пациентов с высоким индексом соматической отягощённости.

Отдельное внимание в литературе уделяется роли цереброваскулярных нарушений и хронической болезни почек, как факторов, способных значительно удлинять сроки мобилизации и усиливать воспалительный ответ [8, 9]. Наличие выраженного соматического фона, особенно в сочетании с повышенной тревожностью или депрессией, может не только повышать интенсивность послеоперационной боли, но и замедлять функциональное восстановление, что требует адаптации реабилитационных протоколов [10, 11].

Современные исследования подтверждают необходимость учёта коморбидности не только как фона, но как активного клинического фактора, влияющего на все этапы лечения пациентов с колоректальным раком. Это определяет актуальность разработки подходов, учитывающих соматическую отягощённость в протоколах ведения, включая оценку риска, выбор методики обезболивания и организацию послеоперационной помощи.

Материалы и методы

В исследование включены 106 пациентов, перенесших хирургическое вмешательство по поводу КРР. Оценивались параметры восстановления, длительность госпитализации, наличие побочных эффектов и показатели воспаления. Особое внимание уделялось наличию следующих состояний: острое нарушение мозгового кровообращения (ОНМК), сахарный диабет 2 типа, хроническая болезнь почек (ХБП), гипертоническая болезнь, хроническая сердечная недостаточность. Количество пациентов с указанными сопутствующими заболеваниями приведено в таблице №1.

Таблица 1.

Количество пациентов с сопутствующими заболеваниями

Нозология	Изолированное	Сочетанные
ОНМК	0	4
Сахарный диабет 2 типа	6	17
ХБП (пиелонефрит/киста почки)	6	7
Артериальная гипертензия	16	63
Хроническая сердечная недостаточность	0	61

Как видно из таблицы, преобладали лица с множественными коморбидными состояниями. Наиболее часто встречались артериальная гипертензия (у 74,5 % пациентов) и хроническая сердечная недостаточность (57,5 %), преимущественно в сочетании с другими патологиями. Изолированные формы сопутствующих заболеваний регистрировались относительно редко — например, сахарный диабет 2 типа и ХБП наблюдались как в изолированном варианте (6 случаев каждый), так и в составе сочетанной патологии. ОНМК, а также ХСН, в рамках изолированных состояний не встречались. Эти данные подчеркивают высокую степень соматической отягощённости у большинства больных, что следует учитывать при интерпретации исходов лечения и планировании послеоперационного ведения.

Результаты

Пациенты с выраженной коморбидностью характеризовались увеличением продолжительности госпитализации и замедленным восстановлением кишечной моторики. У лиц с ОНМК средняя длительность пребывания в стационаре увеличивалась на 1,5 суток по сравнению с пациентами без такой патологии ($p = 0,03$). Аналогичная, хотя и не статистически значимая, тенденция отмечалась у больных с диабетом и ХБП.

Отмечено, что метаболические нарушения, включая диабет, приводят к замедлению перистальтики

и дефекации, вероятно, вследствие нейропатических и микроангиопатических осложнений. Пациенты с ХБП демонстрировали повышенную выраженность воспалительного ответа, что затрудняло раннюю мобилизацию и реабилитацию.

Для оценки влияния различных сопутствующих заболеваний на длительность пребывания в стационаре был проведён сравнительный статистический анализ. В таблице №2 приведены средние значения продолжительности госпитализации среди пациентов с конкретными нозологиями и без них.

Таблица 2.

Продолжительность госпитализации пациентов в среднем в зависимости от наличия сопутствующих заболеваний

Нозология	Количество пациентов с заболеванием, n	Продолжительность госпитализации (среднее)		p*	t**
		С заболеванием, дней	без заболевания, дней		
ОНМК	4	13,25	11,71	0,03	2,73
Сахарный диабет 2 типа	23	11,91	11,72	0,75	0,30
ХБП	13	12	11,73	0,80	0,24
Артериальная гипертензия	79	11,56	12,37	0,22	-1,22
Хроническая сердечная недостаточность	61	11,8	11,71	0,87	0,15

Примечание: p* — уровень статистической значимости; t** — критерий Стьюдента

Как видно из представленных данных, достоверное увеличение длительности госпитализации отмечалось только у пациентов с ОНМК (p = 0,03). Для остальных сопутствующих заболеваний статистически значимых различий не выявлено. Это может быть связано как с особенностями течения указанных заболеваний, так и с уровнем их компенсации в госпитальном периоде. Наибольшее численное преобладание наблюдалось в группе с артериальной гипертензией, однако наличие этого состояния не ассоциировалось с удлинением госпитализации. Полученные результаты подчёркивают селективное влияние определённых коморбидных состояний на восстановительный процесс у пациентов с КРР.

Кроме того, анализ лабораторных показателей показал более высокий уровень нейтрофилов и С-реактивного белка у пациентов с высокой соматической отягощённостью. Эти изменения коррелировали с удлинением сроков восстановления.

Для оценки вклада коморбидных состояний в продолжительность послеоперационного пребывания был проведён множественный линейный регрессионный анализ с использованием данных 106 пациентов, перенесших хирургическое лечение по поводу КРР. В качестве независимых переменных рассматривались: возраст, индекс массы тела (ИМТ), наличие сахарного диабета 2 типа, ХБП, уровень нейтрофилов, а также применённый метод анальгезии (блокада поперечного пространства живота (transversus abdominis plane block, TAP-блокада) или стандартное обезбоживание).

Таблица 3.

Сравнительный регрессионный анализ факторов

Переменная	Коэффициент	Ст. ошибка	p*	t**
const	10,14	4,46	0,02	2,27
TAP-блокада	-0,82	0,60	0,17	-1,35
Возраст	0,05	0,06	0,37	0,89
ИМТ	-0,05	0,06	0,36	-0,91
СД2	-0,01	0,75	0,97	-0,02
ХБП	-0,04	0,97	0,96	-0,04
Нейтрофилы	0,001	0,06	0,98	0,02

Примечание: p* — уровень статистической значимости; t** — критерий Стьюдента

По результатам регрессионного анализа ни один из включённых факторов не продемонстрировал статистически значимого влияния на продолжительность госпитализации. Например, использование TAP-блокады сопровождалось сокращением срока пребывания в стационаре в среднем на 0,82 дня по сравнению с группой сравнения, однако это различие не достигло статистической значимости ($\beta = -0,82$; p = 0,17). Возраст имел слабую положительную связь с длительностью пребывания в стационаре ($\beta = 0,06$; p = 0,29), что также не является достоверным результатом. ИМТ ($\beta = -0,06$; p = 0,32), наличие сахарного диабета 2 типа ($\beta = -0,05$; p = 0,94) и ХБП ($\beta = -1,67$; p = 0,37), а также уровень нейтрофилов ($\beta = -0,0066$; p = 0,91) также не показали статистически значимого влияния на исследуемую переменную (табл. №3).

Коэффициент детерминации модели составил $R^2 = 0,039$, что указывает на крайне низкую объясняющую способность модели: только 3,9 % вариативности длительности госпитализации объясняется совокупностью включённых факторов. Общая значимость модели также оказалась неудовлетворительной (F = 0,668; p = 0,67), что не позволяет говорить о наличии предсказательной мощности у построенной регрессионной зависимости.

Полученные результаты позволяют предположить, что на сроки стационарного лечения после операций

по поводу КРР могут оказывать влияние иные, не учтённые в данной модели переменные. Это включает такие факторы, как объём хирургического вмешательства, характер интраоперационного течения, частота ранних осложнений, особенности психоэмоционального фона пациентов и их комплаентность в процессе реабилитации. Необходимость учёта этих факторов подчёркивает значимость интегративного, мультидисциплинарного подхода в планировании послеоперационного ведения у коморбидных больных.

Обсуждение результатов

Полученные данные убедительно подтверждают, что коморбидный статус, а не возраст сам по себе, является ключевым прогностическим фактором, определяющим течение раннего послеоперационного периода у пациентов с КРР. Несмотря на то, что большинство пациентов находилось в возрастной группе 60–70 лет, вариабельность их восстановления и склонности к осложнениям в гораздо большей степени коррелировала с тяжестью и характером сопутствующих заболеваний.

Наибольшее статистически достоверное влияние на удлинение сроков госпитализации оказало ОНМК: у таких пациентов средняя длительность стационарного лечения увеличивалась на 1,5 суток по сравнению с остальными случаями ($p = 0,03$), что, вероятно, связано с нарушением нейрогуморальной регуляции, снижением адаптационного резерва и возросшей потребностью в сестринском уходе. Для других состояний, таких как сахарный диабет 2 типа и ХБП, статистически значимой связи с продолжительностью госпитализации выявлено не было. Тем не менее, у пациентов с этими заболеваниями отмечалась тенденция к более выраженному воспалительному ответу (повышение уровня нейтрофилов и С-реактивного белка), что потенциально может отражать замедление восстановления моторики кишечника и отсроченное возобновление перистальтики. Данные наблюдения требуют дальнейшего изучения в расширенных выборках.

Важно подчеркнуть, что даже в условиях применения мультимодальной анальгезии и ТАР-блокады, пациенты с выраженной коморбидностью демонстрировали меньшую динамику ранней мобилизации, что свидетельствует о необходимости адаптации стандартных протоколов ускоренного восстановления пациентов после хирургических вмешательств (Enhanced Recovery After Surgery, ERAS). Также интерес представляет тот факт, что при включении в регрессионную модель таких переменных, как ИМТ, возраст, воспалительные показатели и наличие ХБП или диабета, не удалось объяснить существенную долю вариабельности в длительности госпитализации

($R^2 = 0,039$). Это подчёркивает, что совокупное воздействие множества субклинических факторов (например, психоэмоциональное состояние, особенности послеоперационного ухода, когнитивный статус) может иметь не менее значимое влияние на реабилитационный процесс, чем диагностированные соматические заболевания.

С практической точки зрения, данные подчеркивают необходимость комплексной предоперационной стратификации риска, включая оценку индекса коморбидности Чарлсона; более активного участия врачей общей практики, кардиологов и нефрологов в дооперационной оптимизации состояния; внедрения индивидуализированных маршрутов ведения в послеоперационном периоде — особенно для пациентов с множественными или декомпенсированными сопутствующими заболеваниями.

Таким образом, подход к лечению больных КРР должен быть переориентирован с возрастного принципа на принцип мультисистемной оценки состояния пациента, где решающую роль играет тяжесть и характер коморбидного фона, а не хронологический возраст как таковой.

Заключение

Результаты проведённого исследования подчёркивают важность учёта коморбидности при планировании и ведении послеоперационного периода у пациентов с КРР. Выявлено, что наличие определённых сопутствующих заболеваний, в частности ОНМК, достоверно удлиняет срок госпитализации и осложняет восстановление. Хотя большинство других состояний, таких как сахарный диабет 2 типа, ХБП и артериальная гипертензия, не показали статистически значимого влияния на длительность пребывания в стационаре, они сопровождалась признаками усиленного воспалительного ответа и замедленного восстановления моторной функции кишечника.

Анализ показал ограниченную прогностическую ценность стандартных клинико-лабораторных показателей, что указывает на необходимость более широкой оценки пациента, включая психоэмоциональные и когнитивные аспекты. В этих условиях требуется персонализированный подход к послеоперационному ведению больных с КРР, включающий мультидисциплинарное взаимодействие специалистов, адаптацию реабилитационных протоколов и усиление предоперационной подготовки. Коморбидность следует рассматривать как активный клинический фактор, определяющий не только риски, но и стратегию лечения пациента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sung H., Ferlay J., Siegel R.L., Laversanne M., Soerjomataram I., Jemal A., Bray F. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries // *CA Cancer J Clin.* — 2021. — Vol. 71, No. 3. — P. 209–249.
2. Злокачественные новообразования в России в 2023 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой. — Москва: МНИОИ им. П.А. Герцена — филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2024. — 276 с.: ил. — ISBN 978-5-85502-298-8.
3. Flynn D.E., Mao D., Yerkovich S.T., Franz R., Iswariah H., Hughes A., Shaw I.M., Tam D.P.L., Chandrasegaram M.D. The impact of comorbidities on post-operative complications following colorectal cancer surgery // *PLoS One.* — 2020. — Vol. 15, No. 12. — e0243995. — DOI: 10.1371/journal.pone.0243995.
4. Stavrou E.P., Lu C.Y., Buckley N., Pearson S. The role of comorbidities on the uptake of systemic treatment and 3-year survival in older cancer patients // *Annals of Oncology.* — 2012. — Vol. 23, No. 9. — P. 2422–2428. — DOI: 10.1093/annonc/mdr618.
5. Hain E., Maggiori L., Manceau G., Mongin C., Prost À la Denise M., Panis Y. Effect of transversus abdominis plane block on postoperative morphine consumption and recovery after laparoscopic colectomy: a randomized controlled trial // *World J Surg.* — 2018. — Vol. 42(2). — P. 376–382. DOI: 10.1007/s00268-017-4216-0.
6. Ekstein P., Szold A., Sultan M., Klausner J. M., Weinbroum A. A. Laparoscopic surgery may be associated with severe pain and high analgesia requirements in the immediate postoperative period // *Ann Surg.* — 2006. — Vol. 243(1). — P. 41–46. DOI: 10.1097/01.sla.0000193600.62536.22.
7. Kim T.H., Kang H., Park J.S., Kim H.S., Kim J.T., Bahk J.H. Influence of laparoscopic colorectal surgery on postoperative ileus: comparison with open surgery // *World J Gastroenterol.* — 2005. — Vol. 11(31). — P. 4801–4804. DOI: 10.3748/wjg.v11.i31.4801.
8. Abd-Elsayed A., Karri J., Hanna M., Kaye A.D. Transversus abdominis plane blocks: a review of techniques and applications in chronic pain management // *Curr Pain Headache Rep.* — 2022. — Vol. 26(6). — P. 485–492. DOI: 10.1007/s11916-022-01021-4.
9. Joris J.L., Cigarini I., Legrand M.J., Jacquet N.J., De Groote D., Franchimont P., Lamy M. Metabolic and respiratory changes after cholecystectomy performed via laparotomy or laparoscopy // *Br J Anaesth.* — 2015. — Vol. 73(4). — P. 343–350. DOI: 10.1093/bja/73.4.343.
10. Means-Christensen A.J., Roy-Byrne P.P., Sherbourne C.D., Craske M.G., Stein M.B. Relationships among pain, anxiety, and depression in primary care // *Depression and Anxiety.* — 2008. — Vol. 25(7). — P. 593–600. DOI: 10.1002/da.20450.
11. Michaelides A., Zis P. Depression, anxiety, and acute pain: links and management challenges // *Postgrad Med.* — 2019. — Vol. 131(7). — P. 438–444. DOI: 10.1080/00325481.2019.1655126.

© Гильфанова Римма Анфисовна (rimma-gilfanova@mail.ru); Афанасьева Зинаида Александровна (z-afanasieva@mail.ru);
Гильфанова Рида Анфисовна (rida-gilfanova@mail.ru); Зиганшин Марат Исмагилович (zigamarat@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ЭПИДЕМИОЛОГИЯ РАКА ГЛОТКИ. КЛИНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАКА НОСОГЛОТКИ

EPIDEMIOLOGY OF PHARYNGEAL CANCER. CLINICAL FEATURES OF NASOPHARYNGEAL CANCER

**I. Dolakov
R. Gezgieva
L. Dakieva
Z. Bykova
A. Torshkhoeva
M. Gazdieva**

Summary. Regional lymphadenopathy can be either of inflammatory origin or an early manifestation of cancer of the pharynx, thyroid gland, salivary glands, and skin. Lymphadenopathy is often the main manifestation of a malignant neoplasm in the absence of local or other signs of the underlying disease. At the same time, patients often seek medical help from primary care physicians, and they have been diagnosed with lymphadenitis for a long time. There are still no specific ultrasound signs that allow reliable verification of primary tumor or secondary metastatic lesion of the lymph nodes, to distinguish the inflammatory process from neoplasia, reactive changes.

Also, a large number of other diseases, including systemic pathologies, specific infections, can be the causes of lymphadenopathies. An analysis of the incidence of malignant neoplasms of the pharynx in the Republic of Ingushetia for 2019–2023 is presented, in comparison with the same period in the Russian Federation, a clinical case of a patient with nasopharyngeal cancer who went to a polyclinic with a diagnosis of acute lymphadenitis is presented. Such clinical masks can «hide» the clinic of the underlying pathology for a long time, which delays the verification of the underlying disease and eventually leads to delayed complex therapy of malignant neoplasms. A set of measures aimed at early detection of malignant lesions of the lymph nodes is presented.

Keywords: pharyngeal cancer, diagnostics, risk factors, regional metastases, lymphadenopathy.

Долаков Ибрагим Гапурович

врач-хирург высшей квалификационной категории,
кандидат медицинских наук, доцент,
Ингушский государственный университет
i_dolakov@mail.ru

Гезгиева Райшат Каримовна

врач-хирург высшей квалификационной категории,
кандидат медицинских наук, доцент,
Ингушский государственный университет
rgezgieva@mail.ru

Дакиева Лимара Магомедовна

кандидат медицинских наук, доцент,
Ингушский государственный университет
limara.07@mail.ru

Бекова Зульфия Багаудиновна

врач анестезиолог-реаниматолог, Главный военный
клинический госпиталь имени Н. Н. Бурденко
zulyabkv@mail.ru

Торшхоева Амина Муссаевна

Российский университет медицины
torshoevaamina1@gmail.com

Газдиева Макка Мовсаровна

Ингушский государственный университет
gazdieva.makka@icloud.com

Аннотация. Регионарная лимфаденопатия может быть как воспалительного генеза, так и ранним проявлением рака глотки, щитовидной железы, слюнных желез, кожи. Лимфаденопатия нередко является главным проявлением злокачественного новообразования при отсутствии местных или других признаков основного заболевания. При этом пациенты часто обращаются за медицинской помощью к врачам первичного звена, и длительное время наблюдаются с диагнозом лимфаденита. До сих пор отсутствуют специфические УЗ-признаки, позволяющие достоверно верифицировать первичное опухолевое или вторичное метастатическое поражение лимфатических узлов, отличить воспалительный процесс от неоплазии, реактивных изменений.

Также большое количество других заболеваний, включая и системные патологии, специфические инфекции, могут быть причинами лимфаденопатий. Представлен анализ заболеваемости злокачественными новообразованиями глотки в Республике Ингушетия за 2019–2023 гг., в сравнении с аналогичным периодом в РФ, приведено клиническое наблюдение пациента с раком носоглотки, обратившегося в поликлинику с диагнозом острого лимфаденита. Такие клинические маски могут долго «скрывать» клинику основной патологии, что задерживает верификацию основного заболевания и в итоге приводит к запоздалой комплексной терапии злокачественных новообразований. Представлен комплекс мероприятий, направленный на раннее выявление злокачественного поражения лимфатических узлов.

Ключевые слова: рак глотки, диагностика, факторы риска, регионарные метастазы, лимфаденопатия.

ИГХ — иммуногистохимическое исследование
 ЗНО — злокачественное новообразование
 ЛАП — лимфаденопатия
 ЛС — лекарственные средства
 ЛУ — лимфатический узел
 ПГИ — патогистологическое исследование
 РОД — республиканский онкологический диспансер
 РИ — Республика Ингушетия
 РФ — Российская Федерация
 ТАБ — тонкоигольная аспирационная биопсия
 УЗИ — ультразвуковое исследование
 МРТ — магнитно-резонансная томография

Рак глотки — злокачественная опухоль, развивающаяся из элементов неороговевающего эпителия гортаноглотки, ротоглотки, носоглотки. ЗНО глотки являются одной из самых актуальных и социально значимых проблем в современной онкологии. Ежегодно в России ЗНО глотки выявляются у 6,9–7,5 тыс. человек, заболеваемость у мужчин в 5–6 раза выше, чем у женщин. В РФ частота рака носоглотки в общей структуре онколо-

гической заболеваемости составляет 0,1–0,2 % — у мужчин 0,55 на 100000 населения и у женщин 0,29 [1, 2].

В РФ в 2018 г. впервые выявлено 5667 (0,91 %) случаев ЗНО глотки, из которых 82,7 % III–IV стадии заболевания, а в 2020 г. 5456 — 0,98 % от общего количества всех случаев [3].

В 2023 г. в России абсолютное число впервые в жизни установленных диагнозов ЗНО составило 674587 случаев и на конец года в территориальных онкологических учреждениях состояло на учете 4163202 пациента [4]. При этом отмечалось следующее распределение впервые выявленных ЗНО по стадиям: I стадия — 36,3 %, II — 24,3 %, III — 16,4 %, IV — 18,9%. Максимальное число заболевших приходится на возрастную группу 65–69 лет (18,5 %), морфологически диагноз ЗНО подтвержден в 96,6 % случаев [4].

Основными причинами развития рака глотки считаются:

— курение, алкоголь, жевание различных смесей;



Рис. 1. Абсолютное число впервые в жизни установленных диагнозов злокачественного новообразования глотки в России в 2019–2023 гг.

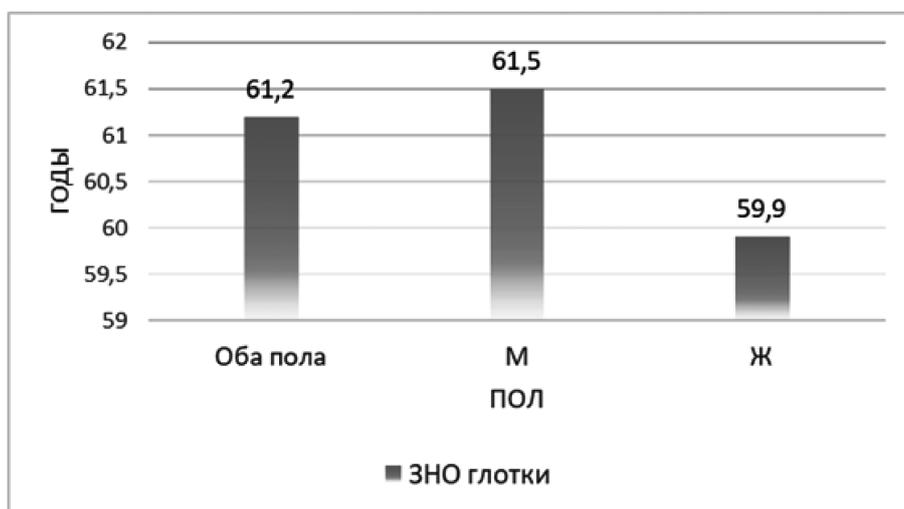


Рис. 2. Средний возраст больных с впервые в жизни установленным диагнозом ЗНО глотки в России в 2023 г.

- вирус папилломы человека, особенно его 16-й и 18-й типы;
- персистенция вируса Эпштейн-Барр;
- хронические воспалительные процессы, вызывающие метаплазию и дисплазию эпителия слизистой оболочки (ларингит, фарингит, тонзиллит и др.);
- вдыхание вредных канцерогенных веществ (нефти, продуктов ее перегонки, бензола, фенольных смол, асбеста);
- рецидивирующий папилломатоз, пахидермия, дискератоз.

Соотношение женщин и мужчин в среднем по РФ 1:4,8.

В Республике Ингушетия за период 2019–2023 гг. абсолютное число впервые в жизни установленных диагнозов ЗНО глотки составило 29 человек: мужчин 23 и женщин 6 (табл. 1). У пациентов с впервые выявленным ЗНО глотки (n=29) I стадия выявлена в 2 случаях (8,3 %), II стадия — у 6 больных (25 %), у 10 пациентов — III стадия (41,7 %) и у 6 — IV стадия (25 %). III и IV стадия выявлены у 16 пациентов из 24 (у 5 больных из 29 проследить стадию ЗНО не удалось), что составляет 86,7 %. Диагноз верифицирован морфологически у 25 пациентов, т.е. в 86,2 % случаев.

Число пациентов, снятых с диспансерного наблюдения в отчетном периоде в связи со смертью от ЗНО глотки — 8 человек, с 2015 года по 2018 год снято с учета в связи со смертью от ЗНО глотки — 16 человек.

Из числа пациентов, взятых под диспансерное наблюдение с впервые в жизни установленным диагнозом

в предыдущем году, умерло от злокачественного новообразования до 1 года с момента установления диагноза 5 человек.

Как видно из рисунка 3, наиболее часто ЗНО глотки выявляются в РИ в возрастных группах 50–54, 55–59 и 60–64 лет. При этом на возрастную группу 60–64 приходится 24,1 % всех случаев. Соотношение женщин и мужчин составило — 1:3,8.

В общей структуре онкологической заболеваемости ЗНО глотки в РИ находятся на 25 месте, и составляют 0,8 % от общего числа больных с ЗНО, находящихся на учете в РОД на конец 2023 года (n=7 944) (рис. 4).

Наиболее частой локализацией патологического процесса при ЗНО глотки является носоглотка — 19 случаев из 29 с впервые выявленным ЗНО глотки — 65,5 % всех случаев.

Для рака носоглотки характерны следующие клинико-морфологические особенности:

- несомненна этиологическая связь с вирусом Эпштейн-Барр. По данным исследований, не менее чем у 90 % больных раком носоглотки выявляется высокий титр IgA к антигенам ВЭБ (у здоровых людей титр IgA к антигенам ВЭБ не превышает 13% [1, 2, 5]. У людей с повышенным титром антител к антигенам ВЭБ в 1,5 %–5 % случаев выявляют ранний бессимптомный рак носоглотки [1, 6];
- в среднем 6–24 месяцев составляет продолжительность этапа амбулаторного наблюдения за больными с раком носоглотки;

Таблица 1.

Зарегистрировано всего больных с раком глотки в РИ за период с 2019 по 2023 гг.

Год	Зарегистрировано всего больных	Всего больных с впервые выявленным образованием			Из числа злокачественных новообразований:						Из них число пациентов с впервые в жизни установленным диагнозом, взятых под диспансерное наблюдение на конец отчетного года	Из них выявлены активно	Состоят на «Д» учете на конец отчетного года	из них: число пациентов, состоящих под диспансерным наблюдением с момента установления диагноза 5 лет и более
		М и Ж	М	Ж	Диагноз подтвержден морфологически	Имели стадию								
						I	II	III	IV					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
2019	33	8	8	0	5	0	2	4	2	8	0	31	14	
2020	33	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	29	14	
2021	60	6	4	2	6	0	1	1	3	6	2	58	50	
2022	60	6	4	2	6	1	1	3	–	6	2	58	50	
2023	64	8	6	2	8	1	2	2	1	8	2	60	45	
Итого		29	23	6	25	2	6	10	6	29	6			

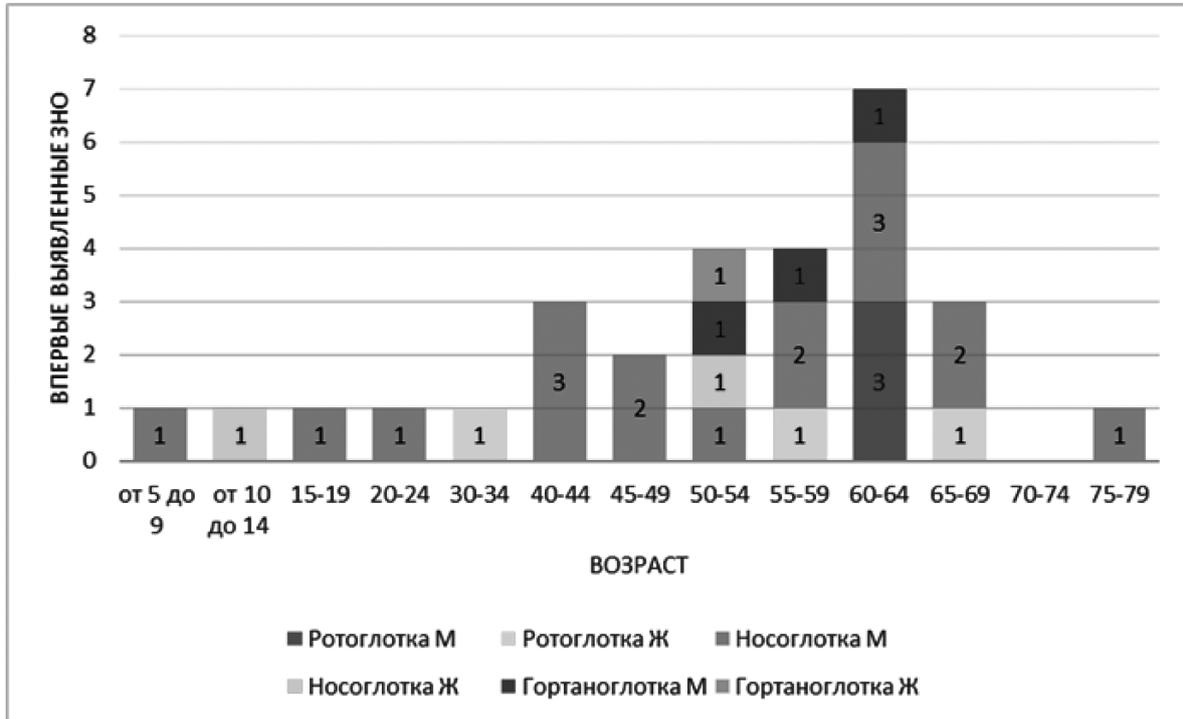


Рис. 3. Распределение больных по возрасту среди пациентов с впервые в жизни установленным диагнозом ЗНО глотки в РИ за 2019–2023 гг.



Рис. 4. Сведения о движении контингента пациентов со злокачественными и другими новообразованиями РИ в 2023 г.

- лишь 15 % пациентов начинают противоопухолевое лечение в сроки до 3 месяцев с момента обращения к врачу, а 7 % — спустя 2–3 года [1, 2];
- морфологически опухоль чаще представлена недифференцированными формами рака с выраженной лимфоидной инфильтрацией — в 70–80 % случаев [1, 5];
- III–IV стадии заболевания выявляют к началу лечения у 85–90 % пациентов;
- метастатическое поражение лимфатические узлов шеи выявляют у 80 % больных, при этом у 50 % из них метастазы в ЛУ шеи являются первым признаком рака носоглотки;
- двустороннее поражение лимфатических узлов отмечается у 40–50 % больных [7];
- отдаленные метастазы, как правило, в кости, печень и легкие, наблюдаются у 30–36 % больных в ранние сроки заболевания;
- частота локализованных форм опухоли, не выходящих за пределы полости носоглотки, не превышает 14–27 %.

Клинические проявления рака глотки складываются из местных симптомов, признаков локорегионарного и отдаленного метастазирования, зависят от локализации первичного очага опухоли. Нередко начальные проявления ЗНО глотки скрываются под маской ангины, острых респираторных вирусных инфекций, ринфарингитов, лимфаденопатий. Это приводит к потере драгоценного для своевременной диагностики ЗНО времени. Регионарные лимфатические узлы поражаются в 77–80 % случаев при раке ротоглотки. Характерно метастатическое поражение ЛУ верхней глубокой яремной цепи, поднижнечелюстных, шейных, заглоточных [8].

Надо отметить, что зачастую единственным поводом обращения больных с ЗНО глотки за медицинской помощью является именно увеличение лимфатических узлов на шее. Как отмечают многие авторы, возникновение метастазов на шее может опережать клинические проявления первичной опухоли, что отрицательно влияет на показатели выживаемости, увеличивает риск появления отдаленных метастазов [8].

В нашей практике на амбулаторном приеме практически ежедневно приходится сталкиваться с ситуациями, когда пациенты обращаются к врачу с лимфаденопатиями. При этом нередко случаи первичнозлокачественного или метастатического поражения ЛУ. Как правило, пациенты направляются с диагнозом острого лимфаденита. При детальном расспросе и осмотре таких пациентов, кажется, что лимфаденопатия является самостоятельной патологией, и нередко только безрезультатное лечение, консультации узких специалистов, дополнительные методы исследования, включая диагностические пункции, позволяют поставить правильный диагноз.

В таких случаях упускается возможность своевременной диагностики и лечения, и запоздалый диагноз ухудшает прогноз в случае выявления ЗНО.

Затрудняет и усложняет диагностику ЛАП большой перечень заболеваний и состояний, которые вызывают первичное поражение ЛУ: бактерии, вирусы, паразиты, системные заболевания, специфическая инфекция (туберкулез), ВИЧ-инфекция. Также определённые ЛС нередко могут вызвать увеличение ЛУ — пенициллины, цефалоспорины, атенолол, капотен и др. Боковые и срединные кисты шеи, заболевания слюнных желез, извитость и аневризмы сонных артерий, последствия перенесенного миозита или травматического повреждения грудино-ключично-сосцевидной мышцы в виде оссификации или склерозирования и уплотнения ее части, меганофиз VII шейного позвонка (шейные ребра — ортопедическая аномалия, как правило, двусторонняя), уплотнение соединительной клетчатки в области затылочных бугров, липомы — могут симулировать шейную ЛАП [9].

ФГБУ «НМИЦ гематологии» (2018) приводит данные исследований 1000 больных с неопухолевыми ЛАП: нозологический диагноз устанавливается только в половине случаев. При этом частота выполнения биопсий у больных с неопухолевыми лимфаденопатиями составляет в среднем 46 %. При лимфаденопатии одной анатомической области соотношение опухоль/не опухоль составляет 1:1, а при генерализованной ЛАП — в 90 % случаев выявляется опухоль, только в 10% случаев определяется иной генез ЛАП [10]. Надо отметить также, что у 10 % больных с исходным диагнозом «неопухолевая лимфаденопатия» при повторной биопсии диагностируются опухоль или не классифицируемая редкая патология [9].

Таким образом, вопрос дифференциальной диагностики ЛАП остается актуальным до сих пор, требует дальнейшей разработки критерии отбора контингента больных для своевременной морфологической верификации диагноза.

В этом плане интересно следующее клиническое наблюдение.

Клиническое наблюдение

Пациент 49 лет, обратился к инфекционисту в городской поликлинике по поводу умеренной боли в левой подчелюстной области и наличия там опухолевидного образования. После осмотра направлен на консультацию к хирургу. Со слов пациента, данное образование заметил случайно около трех недель назад.

Пациент правильного телосложения, рост — 164, вес — 63 кг. Кожные покровы бледно-розовые, теплые,

чистые. Подкожно-жировая клетчатка развита умеренно. Периферических отеков нет. Температура тела 36,6°C. Дыхание свободное, отделяемого из носа нет. ЧД — 16 в минуту. Аускультативно — дыхание везикулярное, хрипов нет. АД 130/80 мм рт. ст. Пульс — 84 в минуту. Живот правильной формы, активно участвует в дыхании всеми отделами. Печень, селезенка не увеличены. Физиологические отправления в норме. Локально-визуально небольшая асимметрия за счет образования левой подчелюстной области, при пальпации определяется увеличенный безболезненный лимфатический узел размерами с голубиное яйцо, подвижный, мягкоэластической консистенции, не спаянный с окружающими тканями и кожей. Гиперемии кожи над лимфоузлом, флюктуации нет.

Данные лабораторных исследований. Общий анализ крови — лейкоциты $7,8 \times 10^9$ /л, гемоглобин — 122 г/л, эритроциты — $4,2 \times 10^{12}$ /л, СОЭ — 14 мм/ч, тромбоциты — 210×10^9 /л. Биохимический анализ крови, общий анализ мочи, рентгенологическое исследование грудной клетки — без патологии. Результат исследования крови на ВИЧ, гепатиты, сифилис — отрицательный. УЗИ мягких тканей левой подчелюстной области: «Лимфатический узел увеличен, диаметром до 22x34 мм, овальной формы, однородной эхоструктуры, гиперэхогенный, с ровными четкими контурами, гиповаскулярный при ЦДК. Заключение — «УЗ-признаки подчелюстного лимфаденита слева». УЗИ органов брюшной полости — патологии не выявлено.

Выставлен диагноз: «Острый подчелюстной лимфаденит слева». Назначено лечение: антибактериальная терапия, анальгетики, витамины, антигистаминные средства.

Надо отметить, что с учетом возраста, отсутствия связи ЛАП с перенесенной вирусно-бактериальной инфекцией, пациент был тщательно расспрошен и осмотрен на предмет возможной онкопатологии или системного заболевания. Проведен тщательный расспрос. Осмотрены все группы ЛУ — доступные пальпации и осмотру ЛУ без изменений. При повторном осмотре через 10 дней — отмечалась лишь незначительная положительная динамика в виде уменьшения размеров ЛУ. В связи с чем консультирован у онколога, диагноз лимфаденита подтвержден. Рекомендовано наблюдение в динамике, назначен второй курс антибактериальной и противовоспалительной терапии.

Спустя еще две недели, учитывая отсутствие положительной динамики принято решение о выполнении под УЗ-контролем трепан-биопсии ЛУ. ПГИ — «в микропрепаратах биоптатов лимфоидная ткань с метастатическими очагами низкодифференцированной аденокарциномы солидного строения, очагами некроза

и воспалительной лимфолейкоцитарной инфильтрацией». ИГХ — «гистологическая структура и фенотип метастатических очагов соответствуют метастазам плоскоклеточной неорогевывающей карциномы, EBV— и HPV/r16-негативного в шейный ЛУ слева». Проведено дообследование. При МРТ головного мозга, шеи с контрастированием выявлено ЗНО носоглотки. Заключение МРТ: «При МР-исследовании головного мозга данных за NEO не получено. МРТ признаки новообразования носоглотки с регионарной лимфаденопатией». На МРТ мягких тканей шеи выявлена ЛАП шейных ЛУ, больше выраженная в подчелюстной области слева.

Диагноз: «ЗНО носоглотки, T1N3M0. Ст. IVB».

Больному проведен курс ХЛТ в онкологическом диспансере, в дальнейшем проведены курсы ПХТ. При МР-исследовании в динамике от 06.04. 2022 г. (спустя чуть больше четыре месяца от первого МРТ головного мозга и шеи) — отмечается положительная динамика в виде полного регресса новообразования носоглотки с сохранением невыраженного утолщения стенки без патологического изменения сигнала, также неполный регресс mts-регионарной ЛАП с признаками частичного фибрирования».

Заключение

К сожалению, отмечается стабильный рост заболеваемости населения РФ ЗНО практически всех локализаций, часто ЗНО выявляются на III–IV стадиях заболевания. В РИ в 2023 выявлено всего (без выявленных посмертно) 1031 случаев ЗНО, морфологически диагноз подтвержден в 97,8 %. Стадии заболевания прослежены у 994 больных, III–IV стадии выявлены у 386 пациентов, т.е. в 37,4 % случаев. Рак глотки за 2019–2023 гг. впервые выявлен у 29 больных, III–IV стадии установлены в 86,7 %, основной локализацией является рак носоглотки, выявленный в 19 случаях из 29 с впервые выявленным ЗНО глотки — 65,5 %.

ЛАП шейных, подчелюстных (односторонняя или двусторонняя) узлов, может быть, одной из клинических масок ЗНО глотки, что затрудняет своевременную диагностику основной патологии и задерживает оказание специализированной медицинской помощи. Необходимо учитывать и частое поражение шейных ЛУ при раке щитовидной железы, слюнных желез, кожи. Следует подчеркнуть, что в случае дифференцированного рака щитовидной железы метастазы в регионарные лимфатические узлы обнаруживаются в 50–60 % всех случаев [11].

Необходимо разработать алгоритм ведения пациентов с шейной ЛАП, обеспечить преемственность на всех этапах оказания медицинской помощи. При неясности клинической ситуации безотлагательно провести ТАБ

(трепан-биопсию) ЛУ под УЗ-контролем с проведением цитогистологического исследования материала, при сомнительном результате которой решить вопрос об открытой биопсии ЛУ. Считать группой риска лиц старше 45 лет, особенно при появлении признаков ЛАП без предшествующего «инфекционного» анамнеза, лиц с высоким титром антител к ВЭБ, проводить всем консультации оториноларинголога, инфекциониста, назначить УЗИ всех групп шейных ЛУ, слюнных желез, щитовидной железы, при необходимости привлекать к консультации онколога.

Особенно опасны недифференцированные формы рака ЩЖ, результаты лечения которых прямо зависят от времени его начала, поэтому врачам первичного звена следует приложить максимальные усилия для быстрой маршрутизации пациентов в специализированные клиники с соответствующими лечебно-диагностическими возможностями [11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Чуприк-Малиновская Т.П., Алиев Б.М. Рак носоглотки: состояние диагностики и отдаленные результаты лечения. *Клин. Вест. МЦ при Правительстве РФ* 1993, №1, 14–15.
2. Чуприк-Малиновская Т.П. Рак носоглотки: вопросы диагностики и лечения. *Практическая онкология*. Т. 4, № 1–2003. 38–44.
3. Н.А. Дайхес, В.В. Виноградов, И.А. Ким, О.В. Карнеева, С.С. Решульский, А.М. Хабазова. Современные методы ранней диагностики опухолей гортани и глотки. *Вестник оториноларингологии* 2021, Т. 86, №3, с. 46–51
4. А.Д. Каприна, В.В. Старинский, А.О. Шахзадова. Злокачественные новообразования в России в 2020 году (заболеваемость и смертность). Москва, 2021.
5. Павлов А.С., Стиоп Л.Д. Злокачественные опухоли носоглотки и их лучевое лечение. *М. Медицина*. — 1985, 240 с.
6. Zong Y.S., Sham J.S., Ng MN. et al. Immunoglobulin A against viral capsid and indirect mirror examination of the nasopharynx in the detection of a symptomatic nasopharyngeal carcinoma. *Cancer*. 1992.v 69. №1.3-7.
7. En Pee L. Pei-Gun L. Radiation therapy of nasopharyngeal carcinoma: prognostic factors based on a 10-year follow-up of 1302 patients. — *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 1989. v.16. №2, 301–305.
8. Рак носоглотки. Клинические рекомендации МЗ РФ. 2020
9. Национальные клинические рекомендации по диагностике лимфаденопатий. Национальное гематологическое общество. 2018 год.
10. Савина Т.А. Лимфаденопатии различной этиологии в клинике туберкулеза периферических лимфатических узлов. Дисс. докт. мед. наук. Москва, 1997; с. 450.
11. В.А. Солодкий, Д.К. Фомин, Д.А. Галушко, А.Г. Асмарян. Предикторы скрытого метастатического поражения лимфатических узлов центральной зоны шеи у больных дифференцированным раком щитовидной железы на ранних стадиях. *Клиническая и экспериментальная тиреоидология*, 2018, том 14, №1. 19–24.

© Долаков Ибрагим Гапурович (i_dolakov@mail.ru); Гезгиева Райшат Каримовна (rgezgieva@mail.ru);
Дакиева Лимара Магомедовна (limara.07@mail.ru); Бекова Зульфия Багаудиновна (zulyabkv@mail.ru);
Торшхоева Амина Муссаевна (torshoevaamina1@gmail.com); Газдиева Макка Мовсаровна (gazdieva.makka@icloud.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АРТЕРИАЛЬНЫЕ АНАСТОМОЗЫ МЕЖДУ НАРУЖНОЙ И ВНУТРЕННЕЙ СОННЫМИ АРТЕРИЯМИ ПРИ КРОВОТЕЧЕНИЯХ У ПАЦИЕНТОВ С РАСПАДАЮЩИМИСЯ ОПУХОЛЯМИ ГОЛОВЫ И ШЕИ. ЭНДОВАСКУЛЯРНЫЙ ГЕМОСТАЗ И ЭМБОЛОТЕРАПИЯ В ИНТЕРВЕНЦИОННОЙ ОНКОРАДИОЛОГИИ

ARTERIAL ANASTOMOSES BETWEEN THE EXTERNAL AND INTERNAL CAROTID ARTERIES IN BLEEDING IN PATIENTS WITH DISINTEGRATING TUMORS OF THE HEAD AND NECK. ENDOVASCULAR HEMOSTASIS AND EMBOLOTHERAPY IN INTERVENTIONAL ONCORADIOLOGY

**A. Zagorulko
G. Nistratov
A. Golubcov
D. Kozlov
A. Koledinskiy
S. Rykov**

Summary. Bleeding from advanced malignant neoplasms of the head and neck occurs in every tenth patient. The main method of stopping bleeding is ligation of the external carotid artery or its branches. An alternative method of combating bleeding is endovascular embolization of tumor vessels, as well as anastomoses with vessels on the opposite side.

Objective of the study. To evaluate the effectiveness of transarterial embolization for the treatment of bleeding in head and neck tumors in patients with developed inter— and intrasystemic anastomoses.

Material and methods. From January 2023 to May 2024, in the conditions of the ORCHMDiLN^{№2} Department of Oncology Center^{№1} of City Clinical Hospital named after S.S. Yudin, 57 patients underwent 61 endovascular embolizations for bleeding from the tumor.

Results. During angiography, tumor vessels with a tumor spot were detected in 9 patients (15.8 %), while during PDCT — 26 (45.6 %), in 3 — extravasation of contrast agent (5.3 %), arteriovenous shunt — in 27 (47.3 %). Transarterial embolization was performed with the introduction of a catheter through the branches of the external carotid artery in 52 cases (91.2 %), only the external carotid artery in 4 patients (7 %), including one of these patients underwent embolization of the branches supplying blood to the tumor and through the vertebral artery (1.8 %). Hemostasis was achieved angiographically in all patients. Recurrent bleeding occurred in five patients (8.8 %). In three patients, bleeding was noted after two months, in one patient after 4 days. Three patients had a complication in the form of acute cerebrovascular accident.

Conclusion. Endovascular method of hemostasis in bleeding from tumors of the head and neck, as well as the method of reducing intraoperative blood loss is effective.

Загоруйко Алексей Иванович

кандидат медицинских наук, заведующий, отделение рентгенохирургических методов диагностики и лечения №2, филиал «Онкоцентр №1 ГКБ имени С.С. Юдина, г. Москва»; врач, ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы», г. Москва
alexrus80@yandex.ru

Нистратов Григорий Павлович

кандидат медицинских наук, врач, отделение рентгенохирургических методов диагностики и лечения №2, филиал «Онкоцентр №1 ГКБ имени С.С. Юдина, г. Москва»
hyppokrat-g@mail.ru

Голубцов Андрей Константинович

доктор медицинских наук, профессор, заведующий, отделение опухолей головы и шеи, ФГБНУ «Российский научный центр хирургии им. акад. Б.В. Петровского», г. Москва
andgol09@yandex.ru

Козлов Денис Владимирович

кандидат медицинских наук, врач сердечно-сосудистый хирург, Государственное бюджетное учреждение здравоохранения «Городская клиническая им. Ф.И. Иноземцева», г. Москва
kozlovden@mail.ru

Колединский Антон Геннадьевич

доктор медицинских наук, заведующий, ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы», г. Москва
koledant@mail.ru

Рыков Станислав Павлович

Врач, отделение рентгенохирургических методов диагностики и лечения №2, филиал «Онкоцентр №1 ГКБ имени С.С. Юдина, г. Москва»
stanislav.rukov@yandex.ru

Аннотация. Кровотечения при запущенных злокачественных новообразованиях головы и шеи встречаются у каждого десятого пациента. Основным методом остановки кровотечения является перевязка наружной сонной артерии или её ветвей. Альтернативным методом борьбы с кровотечениями служит эндоваскулярная эмболизация опухолевых сосудов, а также анастомозов с сосудами противоположной стороны.

Цель исследования. Оценить эффективность трансартериальной эмболизации, для лечения кровотечений при опухолях головы и шеи у пациентов с развитыми меж- и внутрисистемными анастомозами.

Keywords: tumors of the head and neck, bleeding, X-ray endovascular methods of stopping bleeding, prevention of bleeding.

Введение

Количество впервые выявленных злокачественных новообразований в России в 2022 г. увеличилось на 7,6 % по сравнению с 2021 г. В 2022 г. заболеваемость злокачественными новообразованиями головы и шеи составила 11,8 на 100 тысяч населения (губа — 1,26; полость рта — 6,57; глотка — 3,97). Онкологическая смертность так же увеличивается и в 2022 г. составила 14,6 %, тогда как в 2021 г. — 11,4 %. Смертность при ЗНО губы, полости рта, глотки в 2022 г. была 6,31 (2021 г. — 6,32) на 100 тысяч населения [5]. В терапии опухолей головы и шеи используют хирургию, химиотерапию, радиотерапию, все они могут спровоцировать такое осложнение как кровотечение из ткани опухоли [21, 11, 25, 12, 13]. Лечение плоскоклеточного рака головы и шеи (ПРГШ) является актуальной, сложной медицинской и социальной проблемой современной онкологии. Несвоевременное обращение к врачу становится причиной выявления поздних стадий заболевания [3]. Suárez и соавторы отметили повышенный риск развития кровотечения у пациентов после химиотерапии и радиотерапии до 7,6 раз [20]. Частота кровотечений при запущенных злокачественных образованиях головы и шеи достигает по разным данным 10–14 % [10,17, 22]. В связи с тем, что новообразования ротоглотки нарушают физиологический процесс дыхания, пищеварения, они также приводят к грозному осложнению — кровотечение из сосудистого русла при распаде опухоли. При поступлении таких пациентов лечение необходимо проводить безотлагательно [2]. Основным методом устранения кровотечения в таких случаях является перевязка ветвей и/или

Материал и методы. С января 2023 года по май 2024г. в условиях отделения ОРХМДиЛ№2 онкологического центра №1 ГКБ им. С.С. Юдина 57 пациентам выполнено 61 эндоваскулярная эмболизация по поводу кровотечения из опухоли.

Результаты. При выполнении ангиографии, у 9 пациентов выявлены опухолевые сосуды с опухолевым пятном (15,8 %), в то время как при ПДКТ — 26 (45,6 %), у 3 — экстрavasация контрастного вещества (5,3 %), артериовенозный шунт — у 27 (47,3 %). Трансартериальную эмболизацию осуществляли с введением катетера через ветви наружной сонной артерии в 52 случаях (91,2 %), только наружной сонной артерии у 4 пациентов (7 %), в том числе у одного из этих пациентов была выполнена эмболизация ветвей кровоснабжающих опухоль и через позвоночную артерию (1,8 %). У всех пациентов ангиографически достигнут гемостаз. Повторные кровотечения возникло у пятерых пациентов (8,8 %). У троих пациентов кровотечение отмечено через два месяца, у одного пациента через 4 дня. Трое пациентов имели осложнение в виде острого нарушения мозгового кровообращения. *Заключение.* Эндоваскулярный метод гемостаза при кровотечениях из опухолей головы и шеи, а также способ снижения интраоперационной кровопотери является эффективным.

Ключевые слова: опухоли головы и шеи, кровотечение, рентгенэндоваскулярные методы остановки кровотечения, профилактика кровотечения.

наружной сонной артерии, в том числе с двух сторон, при этом не отмечается выраженных неврологических и функциональных изменений органов головы и шеи [8]. В случаях, когда лигирование наружной сонной артерии и ее ветвей не эффективны, может быть выполнена перевязка общей сонной артерии, которая приводит к тяжелым и необратимым изменениям в головном мозге. Изменения мозгового кровоснабжения при односторонней перевязке сонных / позвоночных артерий зависят от строения Виллизиева круга, строения стенки и просвета сосудов, коллатералей, их способности поддерживать достаточное давление в сосудах на стороне поражения [9]. Особенности опухолей головы и шеи является вовлечение в процесс крупных сосудов, что объясняет плохой прогноз, с общим уровнем выживаемости 35 %–50 % [15]. Устранение кровотечения открытым путем затрудняется гемодинамической нестабильностью, плохой визуализацией и трудностью топографии источника кровотечения. Wang и соавторы в своем исследовании показали, что частота рецидивного кровотечения достигает 48,5 %, а внутрибольничная смертность — 13 %, они так же отметили повышенный индекс массы тела как защитный фактор повторного кровотечения, в то время как химиотерапию, и новый онкологический процесс — факторами риска рецидивного кровотечения у пациентов с опухолями головы и шеи [23]. К одной из причин рецидивирования кровотечения относится восстановление гемоциркуляции в органе и соответственно опухоли, через коллатерали от смежных сосудов и анастомозов контралатеральной сонной артерии [7, 19]. Так в статье Marc A. Lazzaro и соавт. приводится таблица значимых анастомозов ветвей наружных сонных артерий (табл.1) [16].

Таблица 1.
Значимые анастомозы ветвей наружных сонных артерий

Артерия	Известные анастомозы
верхняя щитовидная	контралатеральные верхняя щитовидная и нижняя щитовидная артерии
Язычная	контралатеральная язычная артерия, верхняя щитовидная артерия
Лицевая	язычная артерия, глазная артерия, редко с восходящей глоточной артерией
восходящая глоточная	ВСА, позвоночная артерия, менингогипофизарный ствол, средняя менингеальная артерия, нижняя барабанная артерия
задняя ушная	менингеальные анастомозы с ММА и восходящей глоточной
затылочная	трансоссально к задней черепной ямке, мышечные ветви к ВА
внутренняя верхнечелюстная	ВСА (через Видиеву артерию (артерия крыловидного канала) и нижнелатеральный ствол), глазная артерия
средняя менингеальная	рецидивирующий офтальмологический к глазу и ВСА, нижнелатеральный ствол
поверхностная височная	глазная артерия через надглазничную ветвь

С развитием рентгенэндоваскулярных методов лечения появилась возможность выполнения эндоваскулярной эмболотерапии с целью гемостаза и некоторых видов воздействия на опухоль (химиотерапия, радиотерапия). В настоящее время применение данных методик в онкологии за частую направлено на паллиативное воздействие при неоперабельных процессах [7], но с каждым годом использование рентгенэндоваскулярных методов лечения в онкологии усиливает свою позицию, и включается в стандарты лечения опухолей разных локализаций. «Золотым стандартом» в диагностике является ангиография брахиоцефальных артерий с выполнением плоскодетекторной компьютерной ангиографии (ПДКТ), демонстрирующая объем, расположение и васкуляризацию опухоли [4]. Превентивное использование эндоваскулярного гемостаза в хирургии так же становится более востребованной, снижая долю кровопотери во время операции, оказывая хороший гемостатический эффект. Все перечисленное показывает важность поиска новых способов и усовершенствование имеющихся методов остановки и профилактики кровотечения при злокачественных опухолях, в особенности новообразований головы и шеи.

Материал и методы

Визуальный анализ ангиограмм, протоколов операций и историй болезни 57 пациентов, у которых произошло опухолевое кровотечение в период с января 2023 года по май 2024г. в условиях отделения опухолей головы и шеи онкологического центра №1 ГКБ им. С.С. Юдина. Средний возраст составил 60,5 (от 49 до 84 лет). Средний индекс массы тела равен 23,2 (минимальный — 15,3, максимальный — 37,3). Частота сердечных сокращений была от 62 до 122 в минуту (средняя — 82,5). Мужчин было 44 (77,2 %), женщин 13 (22,8 %) (табл. 2). Распределение по локализации представлено в табл. 3.

Таблица 2.

Характеристики выборки

Признак	Среднее значение
возраст	60,5
ИМТ	23,2
ЧСС	82,5

Таблица 3.

Распределение пациентов по локализации опухоли

Локализация опухоли	Количество n = 57	Проценты (%)
Губа	1	1,75
Язык	3	5,26
Дно полости рта	7	12,28
Околоушная слюнная железа	1	1,75
Миндалины	2	3,51
Ротоглотка	19	33,33
Нижние отделы глотки	3	5,26
Придаточные пазухи	4	7,02
Гортань	9	15,79
Десна	2	3,51
Неуточненная часть полости рта	1	1,75
Полость носа	1	1,75
Меланома кожи лица	1	1,75
Саркома челюсти	1	1,75
Метастаз без ВПО	2	3,51

Распределение пациентов по TNM и стадии представлены на рисунке 1 и 2.

Из рис. 1 и 2 видно, что основной объем пациентов был с IV стадией (T2N2M0, T2N3M0, T3N2M0, T3N3M0,

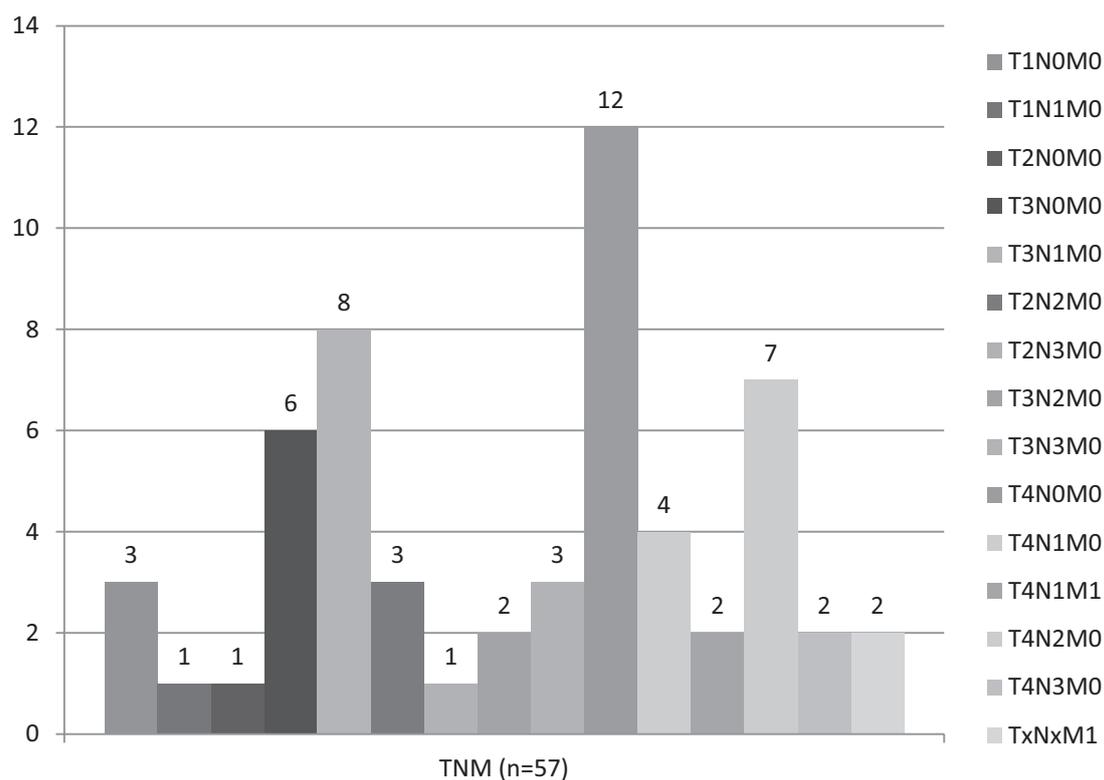


Рис. 1. Распределение пациентов по TNM

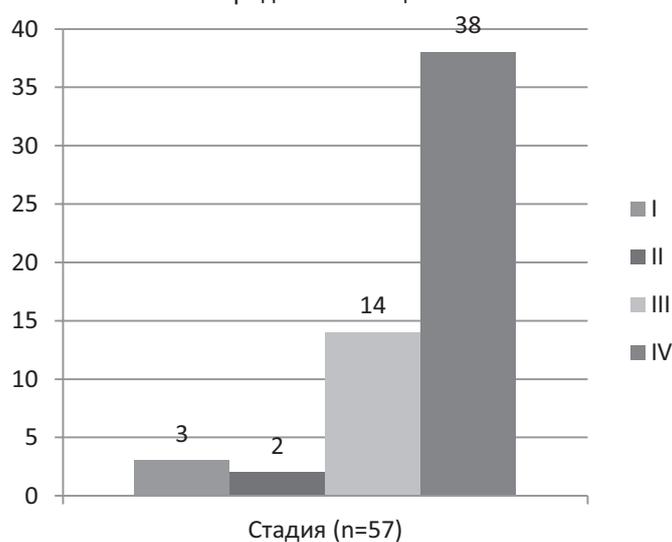


Рис. 2. Распределение пациентов по стадиям

T4N0M0, T4N1M0, T4N1M1, T4N2M0, T4N3M0, TxNxM1) и составил 38 больных (66,67 %), с III стадией (T3N0M0, T3N1M0) — 14 (24,56 %). Пять пациентов, с I и II стадией, после проведенного комплексного лечения с прогрессированием заболевания в виде метастазов в мягкие ткани и лимфоузлы шеи.

Выполнено 61 оперативное эндоваскулярное лечение у 57 пациентов с признаками кровотечения из опухоли на аппарате Philips Azurion 7 M20. Четверо из этих

пациентов получили повторный курс эмболизации сосудов в различные сроки в связи с рецидивом кровотечения. Доступ в 5 случаях (8,8 %) через лучевую артерию и в 52 (91,2 %) — бедренную артерию. Для выявления источника кровотечения выполняли прямую ангиографию общей, внутренней и наружных сонных артерий, как на стороне поражения опухолью, так и на контрлатеральной стороне для выявления анастомозов опухоли. При локализации метастазов опухоли в лимфоузлах на боковых поверхностях шеи эндоваскулярной

диагностике плюс исследовали ветви от подключичных артерий, включая позвоночные артерии. Основным эмболизирующим материалом служили эмболизационные спирали, но в отдельных случаях, когда не удавалось достичь гемостатического эффекта применяли комплекс мер, состоящий из микросфер и микроспиралей — так называемая «сендвич» эмболизация (табл. 4).

Таблица 4.

Применение эмболизирующих материалов

Эмболизирующий материал	Количество, n=57
Спираль	29
Микросферы	5
Спираль и микросферы	23

У 29 пациентов использовали только спирали (50,8 %), у 5 — сферы (8,8 %) и у 23 — спирали и сферы (40,4 %). В 14 случаях эмболизация выполнялась с одной стороны (24,6 %) и в 43 — с двух сторон (75,4 %) (рис. 3).

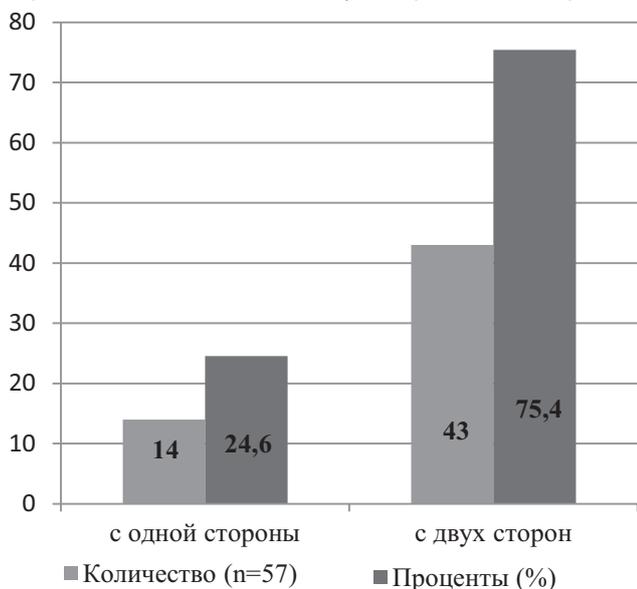


Рис. 3. Сторонность выполнения эмболизации

Результаты

При ангиографии у 9 пациентов выявлены опухолевые сосуды с опухолевым пятном (15,8 %), в тоже время после ПДКТ количество их возросло до 26 (45,6 %), у 3 — экстравазацией контрастного вещества (5,3 %), стенозом ВСА более 50 % у 10 человек (17 %), псевдоаневризмой (n=0) и артериовенозным шунтом у 27 больных (47,3 %) (табл. 5).

Трансартериальную эмболизацию осуществляли с введением катетера через ветви наружной сонной артерии в 52 случаях (91,2 %), только наружной сонной артерии у 4 пациентов (7 %), в том числе у одного из этих пациентов была выполнена эмболизация ветвей кро-

Таблица 5.

Характеристика ангиограмм

Ангиографическая картина	Количество, n=57	Проценты (%)
«Опухолевое пятно» при ангиографии	9	15,8
«Опухолевое пятно» при ПДКТ	26	45,6
Экстравазация контраста	3	5,3
Стеноз ВСА	10	17,5
Артериовенозный шунт	27	47,4

воснабжающих опухоль и через позвоночную артерию (1,8 %) (табл. 6).

Таблица 6.

Локализация катетера при эмболизации

Эмболизация сосудов опухоли из	Количество, n=57	Проценты (%)
Ветвей наружной сонной артерии	52	91,2
Наружной сонной артерии	4	7,0
Наружной сонной артерии и позвоночной артерии	1	1,8

У всех пациентов ангиографически достигнут гемостаз. Пациенты со злокачественными новообразованиями языка имели самый длительный средний срок пребывания в стационаре после трансартериальной эмболизации и самую высокую частоту аспирационной пневмонии — у 3 из 9 пациентов, что составило 33,3 % от числа пациентов с осложнением в виде пневмонии и 5,3 % от общего числа осложнений у пациентов (p<0,05). Повторные кровотечения возникло у пятерых пациентов (8,8 %). У троих пациентов кровотечение отмечено через два месяца, что потребовало эмболизировать развитые коллатерали с контрлатеральной стороны. У одного пациента с большой опухолью (105x89x74мм) кровотечение рецидивировало на госпитальном периоде (через 4 дня), выполнена повторная эндоваскулярная эмболизация и дополнительно перевязка наружной сонной артерии с обеих сторон (рис. 4).

Трое пациентов имели осложнение в виде острого нарушения мозгового кровообращения. Один пациент, вследствие, миграции микросфер через глазничную артерию, один через анастомозы между опухолевыми сосудами большого метастаза на шее и базилярной артерией, один — ретроградно через внутреннюю сонную артерию (табл. 7).

Обсуждение

Знания о большом количестве анастомозов между наружной и внутренней сонными артериями, а также

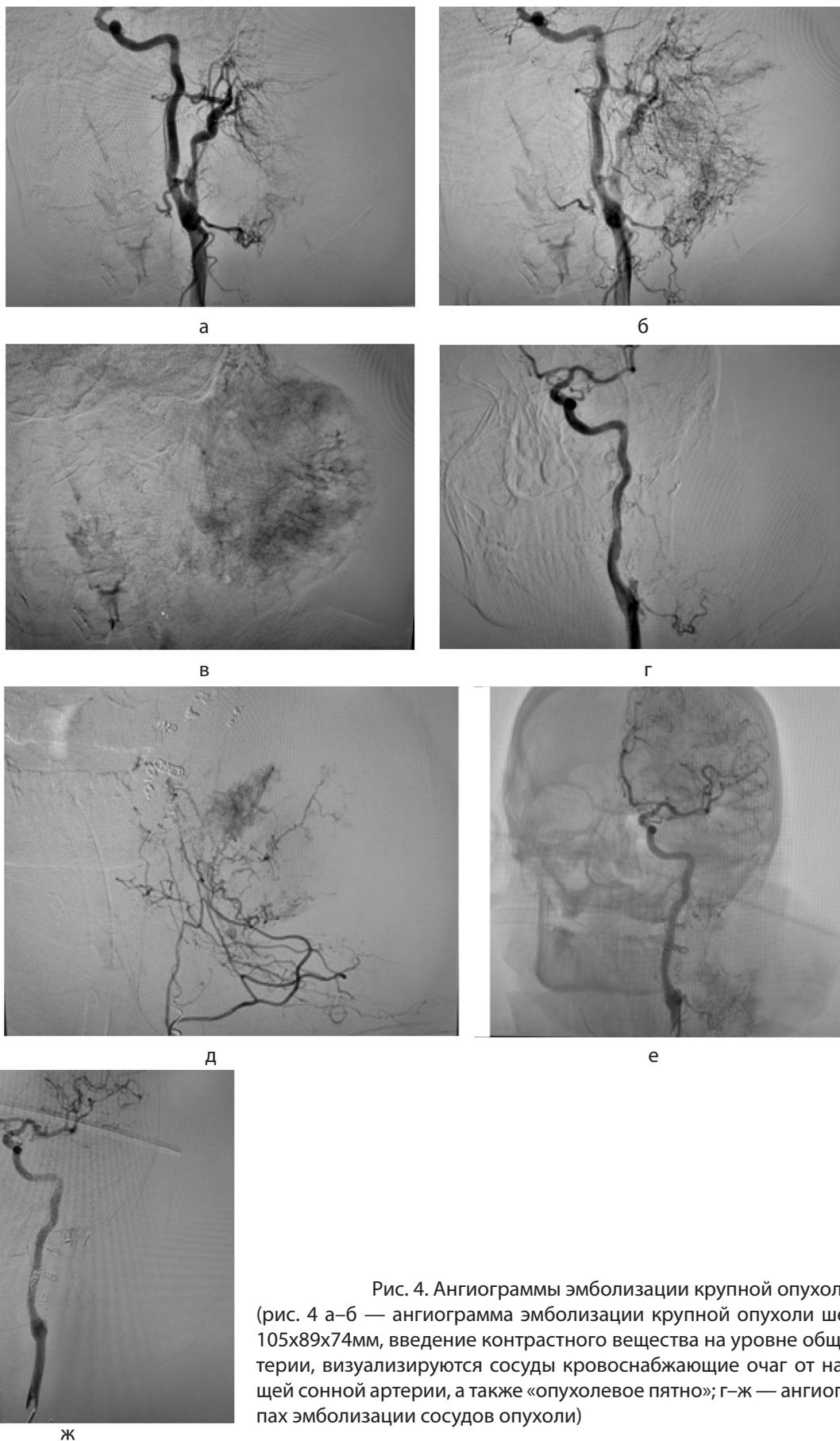


Рис. 4. Ангиограммы эмболизации крупной опухоли (рис. 4 а–б — ангиограмма эмболизации крупной опухоли шеи размерами 105x89x74мм, введение контрастного вещества на уровне общей сонной артерии, визуализируются сосуды кровоснабжающие очаг от наружной и общей сонной артерии, а также «опухолевое пятно»; г–ж — ангиограммы на этапах эмболизации сосудов опухоли)

Таблица 7.
Осложнения после эмболизации

Осложнения	Причина	Количество	Период (дни)
Повторное кровотечение, n=5	коллатерали от противоположной стороны	3	50–60
	недостаточный гемостаз	2	4
Острое мозговое нарушение, n=3	миграция через глазничную артерию	1	1
	миграция через анастомозы на шее и базилярную артерию	1	1
	миграция ретроградно через внутреннюю сонную артерию	1	1

между артериями, отходящими от подключичных сосудов в нормальной анатомии, дают нам возможность заранее спрогнозировать появление возможных патологических сосудов и их развитие в опухолях. Необходимо в обязательном порядке выполнять поиск афферентных сосудов как с ипсилатеральной, так и контрлатеральной стороны. Наш опыт показывает, что эмболизация только на стороне поражения неминуемо приведет к развитию коллатеральной сети и повторному кровотечению. Наиболее эффективной и безопасной техникой оказалась методика эмболизации артерии и устья НСА микроспиралями, то есть создать большую окклюзию по протяженности. Комбинированная техника спирали+сферы является эффективной в плане выраженной ишемии самой опухоли, что проявляется «постэмболизационным синдромом» через 5–10 минут после введения микросфер. Причем выраженность ишемии напрямую коррелирует с диаметром микросфер, что подтверждается литературой [1]. Обязательным условием для применения микросфер при опухолях головы и шеи является наличие информативных ангиограмм выполненных в двух проекциях, а наилучшим решением — применение методики плоско-детекторной томографии. Абсолютно не безопасно вводить микросферы, не выполнив суперселективную ангиографию целевого сосуда. И так, чем наибольшие размеры имеет опухоль или метастаз, тем более выражено, развиты опухолевые сосуды [14, 18], каждый из которых может быть потенциальным источником кровотечения, а также объёмная опухоль может

иметь несколько источников кровоснабжения из разных артериальных бассейнов, что очень важно учитывать при эмболизации.

Терапевтическое вмешательство при кровотечении должно начинаться с установления целей лечения, а выбор лечения основываться на ожидаемой продолжительности и качестве жизни. Следует тщательно обдумать отмену лекарств и антикоагулянтов. Вмешательства по остановке или замедлению кровотечения могут включать системные препараты или переливание компонентов крови. Варианты не инвазивного местного лечения составляют мануальный гемостаз, давящие повязки и лучевую терапию. Инвазивные местные методы лечения включают чрескожную эмболизацию, эндоскопические процедуры и хирургическое лигирование сосудов. Коротких Н.Г. и соавторы показали преимущества эндоваскулярных методов как первоочередного метода при кровотечениях опухолей головы и шеи [6]. Таким образом, эндоваскулярные методы дают возможность диагностики источника кровотечения, кровоснабжения опухоли и одномоментного лечения, как в виде гемостаза или предоперационной эмболизации, так и противоопухолевой терапии.

Заключение

Эндоваскулярный гемостаз при кровотечениях из опухолей головы и шеи является эффективным методом лечения. Однако надо учитывать особенности каждого пациента на предмет извитости сонных артерий, атеросклеротического поражения магистральных сосудов, наличия большого числа анастомозов, в том числе опухолевых, а также выбор эмболизационного материала.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests. Not declared.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Financing. The study had no sponsorship.

Информированное согласие. Пациенты подписали информированное согласие на участие в исследовании.

Informed concert. Patients signed informed consent to participate in the study.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долгушин Б.И., Виршке Э.Р., Буйденко Ю.В., Погребняков И.В., Перегудов Н.А., Францев Д.Ю. Результаты применения насыщаемых микросфер отечественного производства при локорегионарном эндоваскулярном лечении неоперабельных больных со злокачественными опухолями печени. *Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия.* 2022; 5(4):96–106. DOI: 10.37174/2587-7593-2022-5-4-96-106.
2. Загорулько А.И., Нистратов Г.П., Голубцов А.К., Козлов Д.В., Рыков С.П. Методика одномоментного выполнения трахеостомии, эмболизации источника распадающейся опухоли плоскоклеточного рака и гастростомии. *Клиническое наблюдение // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки.* 2025. № 4. С. 198–202. DOI: 10.37882/2223-2966.2025.04.16.
3. Загорулько А.И., Черняев М.В., Козлов Д.В., Голубцов А.К. Лечение плоскоклеточного рака головы и шеи комбинированным методом на основе трансартериальной химиоэмболизации. *Клиническое наблюдение // Лабораторная и клиническая медицина. Фармация.* 2024. Т. 4, № 1. С. 25–33. DOI: 10.14489/Ismp.2024.01.pp.025-033.
4. Загорулько А.И., Нистратов Г.П., Голубцов А.К., Колединский А.Г., Рыков С.П., Роль ангиографии брахиоцефальных артерий и плоскодетекторной КТ в диагностике метастатических узлов шеи и опухоли каротидного гломуса. *Международный журнал интервенционной кардиоангиологии.* 2024; 79 (4): 61–75. <https://doi.org/10.24835/1727-818X-79-61>.
5. Карпин А.Д., Старинский В.В., Шахзадова А.О., Лисичникова И.А. Злокачественные новообразования в России в 2022 году (заболеваемость и смертность). М.: МНИОИ им. П.А. Герцена — филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России. 2023:275.
6. Коротких Н.Г., Ольшанский М.С., Степанов И.В., Щербинин А.С., Лесникова И.Н. Мультидисциплинарные аспекты остановки аррозивных кровотечений из распадающихся опухолей головы и шеи. *Онкохирургия.* 2013; 5(2):18–22.
7. Корытова Л.И., Сокурено В.П., Масленникова А.В. Современные тенденции в терапии местнораспространенного рака ротоглотки и полости рта. Под ред. А.М. Гранова. СПб: ООО «Издательство Фолиант». 2011:45–72.
8. Кузьмицкий М.В. Роль перевязки наружной сонной артерии в лечении злокачественных новообразований полости рта и ротоглотки. Автореферат. 2013:27.
9. Штейнле А.В., Алябьев Ф.В., Дудузинский К.Ю., Ефтеев Л.А., Бодоев Б.В. История хирургии повреждений кровеносных сосудов шеи. *Сибирский медицинский журнал.* 2008; 2:87–97.
10. Bachar G., Esmat N., Stern S., Litvin S., Knizhnik M., Perlow E., Atar E., Shpitzer T., Belenky A. Transarterial Embolization for Acute Head and Neck Bleeding: Eight-Year Experience with Emphasis on Rebleeding Risk in Cancer Patients. *Laryngoscope.* 2013; 123:1220–1226.
11. Cameron A.C., Touyz R.M., Lang N.N. Vascular Complications of Cancer Chemotherapy. *Canadian Journal of Cardiology.* 2016;32(7):852-862. DOI: 10.1016/j.cjca.2015.12.023.
12. Cannavale A., Corona M., Nardis P., Rubeis G., Cannavale G., Santoni M., Gyurgyokai S.Z., Catalano C., Bezzi M. Computed Tomography Angiography findings can predict massive bleeding in head and neck tumours. *European Journal of Radiology.* 2020; 125:108910. DOI: 10.1016/j.ejrad.2020.108910.
13. Chang F.-Ch., Lirng J.-F., Luo Ch.-B., Wang Sh.-J., Wu H.-M., Guo W.-Y., Teng M.M., Chang Ch.-Y. Patients with head and neck cancers and associated postirradiated carotid blowout syndrome: endovascular therapeutic methods and outcomes. *Journal of Vascular Surgery.* 2008;47(5):936–45. DOI: 10.1016/j.jvs.2007.12.030.
14. Forster J.C., Harris-Phillips W.M., Douglass M.J., Bezak E.A review of the development of tumor vasculature and its effects on the tumor microenvironment. *Hypoxia.* 2017; 5:21–32. DOI:10.2147/HP.S133231.
15. Krol E., Brandt C.T., Blakeslee-Carter J., Ahanchi S.S., Dexter D.J., Karakla D., Panneton J.M. Vascular interventions in head and neck cancer patients as a marker of poor survival. *Journal of Vascular Surgery.* 2019;69(1):181–189. DOI: 10.1016/j.jvs.2018.04.058.
16. Lazzaro M.A., Badruddin A., Zaidat O.O., Darkhabani Z., Pandya D.J., Lynch J.R. Endovascular Embolization of Head and Neck Tumors. *Frontiers in Neurology.* 2011; 2:64. DOI: 10.3389/fneur.2011.00064.
17. Lu H-J, Chen K-W, Chen M-H, Chu P-Y, Tai S-K, Wang L-W, Chang PM-H, Yang M-H: Predisposing factors, management, and prognostic evaluation of acute carotid blowout syndrome. *Journal of Vascular Surgery.* 2013;58(5):1226–1235. DOI: 10.1016/j.jvs.2013.04.056.
18. Ribatti D., Pezzella F. Overview on the Different Patterns of Tumor Vascularization. *Cells.* 2021; 10:639. DOI:10.3390/cells10030639.
19. Riles T.S., Bernstein A., Fisher F.S., Persky M.S., Madrid M. Reconstruction of the ligated external carotid artery for embolization of cervicofacial arteriovenous malformation. *Journal of Vascular Surgery.* 1993;17(3):491–98.
20. Suárez C., Fernández-Alvarez V., Hamoir M., Mendenhall W.M., Strojjan P., Quer M., Silver C.E., Rodrigo J.P., Rinaldo A., Ferlito A. Carotid blowout syndrome: modern trends in management. *Cancer Management and Research.* 2018; 10:5617–5628. DOI: 10.2147/CMAR.S180164.
21. Venkatesulu Bh.P., Mahadevan L.Sh., Aliru M.L., Yang X., Bodd M.H., Singh P.K., Yusuf S.W., Abe J.-I., Krishnan S. Radiation-Induced Endothelial Vascular Injury: A Review of Possible Mechanisms. *JACC: Basic to translational science.* 2018;3(4):563–572. DOI: 10.1016/j.jacbs.2018.01.014.
22. Vilas Boas P.P., de Castro-Afonso L.H., Monsignore L.M., Nakiri G.S., de Mello-Filho F.V., Abud D.G. Endovascular Management of Patients with Head and Neck Cancers Presenting with Acute Hemorrhage: A Single-Center Retrospective Study. *CardioVascular and Interventional Radiology.* 2017;40(4):510–519. DOI: 10.1007/s00270-016-1550-8.
23. Wang C.-K., Ho C.-F., Niu K.-Y., Wu Ch.-Ch., Chang Y.-Ch., Hsiao Ch.-H., Yen Ch.-Ch. Risk factors for rebleeding and long-term outcomes in patients with head and neck cancer bleeding: a multicenter study. *BMC Cancer.* 2022; 22:841. DOI:10.1186/s12885-022-09945-y.
24. Weintraub N.L., Jones W.K., Manka D. Understanding radiation-induced vascular disease. *Journal of the American College of Cardiology.* 2010;55(12):1237–1239. DOI: 10.1016/j.jacc.2009.11.053.
25. Yamazaki H., Ogita M., Kodani N., Nakamura S., Inoue H., Himei K., Kotsuma T., Yoshida K., Yoshioka Y., Yamashita K., Udono H. Frequency, outcome, and prognostic factors of carotid blowout syndrome after hypofractionated re-irradiation of head and neck cancer using CyberKnife: a multi-institutional study. 2013;107(3):305-9. DOI: 10.1016/j.radonc.2013.05.005.

ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ, ПРОФИЛАКТИКЕ И ЛЕЧЕНИЮ ПРЕЭКЛАМПСИИ: МНОГОЦЕНТРОВОЕ ПРОСПЕКТИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

PERSONALIZED APPROACHES TO PREDICTION, PREVENTION, AND TREATMENT OF PREECLAMPSIA: A MULTICENTER PROSPECTIVE STUDY

**A. Klassov
L. Nemtseva
O. Vesnina
V. Genina
V. Ivashchenko
E. Popova**

Summary. In a multicenter prospective cohort study conducted from 2021 to 2023 at 12 obstetric centers in Russia, a personalized algorithm for predicting and preventing preeclampsia was developed and validated. The study included 2,242 pregnant women who underwent comprehensive first-trimester screening with assessment of clinical, biochemical (PAPP-A, PlGF, sFlt-1, sEng), ultrasound (uterine artery PI) and genetic markers. The integrated predictive model demonstrated high accuracy (AUC 0.94; sensitivity 87.4 %, specificity 92.1 %), enabling stratification of patients by risk.

High-risk patients (n = 289) were randomized into three prevention groups: standard care, low-dose acetylsalicylic acid (ASA, 150 mg/day) and a personalized strategy tailored to the pathogenetic variant of preeclampsia. Five main variants were identified: placental (30.1 %), endothelial (23.5 %), metabolic (18.7 %), immunological (14.5 %) and mixed (13.1 %). Personalized prevention showed significant superiority: a 70 % reduction in preeclampsia incidence (27.1 % vs 89.7 % in controls; RR 0.30), whereas ASA monotherapy achieved only a 29 % reduction (incidence 63.5 %; RR 0.71).

The personalized approach substantially improved clinical outcomes. In the personalized management group, the rate of severe maternal complications fell from 41.4 % to 11.5 % (p < 0.001), and hospital stay shortened from 12.7 to 8.5 days. Perinatal outcomes also improved: preterm birth before 34 weeks decreased from 33.3 % to 17.2 % (p = 0.014), intrauterine growth restriction from 31.0 % to 18.4 % (p = 0.050), and neonatal asphyxia from 26.4 % to 13.8 % (p = 0.034). The study confirms the clinical value of differentiated management based on pathogenetic subtypes of preeclampsia, allowing optimization of healthcare resources and reduction of maternal and perinatal morbidity.

Keywords: preeclampsia, personalization, prediction, prevention, multicenter study.

Классов Алибек Мурзабекович

Исследователь, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского»
Alibekklassov1989@gmail.com

Немцева Лада Андреевна

Исследователь, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского»
Soul339@mail.ru

Веснина Олеся Вячеславовна

Исследователь, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского»
Vesninaol64@mail.ru

Генина Вероника Александровна

Исследователь, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского»
v.genina@inbox.ru

Иващенко Виктория Владимировна

Исследователь, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского»
Ivashchenko.viktoriya@yandex.ru

Попова Екатерина Алексеевна

Исследователь, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского»
katerina_popova2702@mail.ru

Аннотация. В рамках многоцентрового проспективного когортного исследования, проведенного с 2021 по 2023 год в 12 акушерских центрах России, разработан и валидирован персонализированный алгоритм прогнозирования и профилактики преэклампсии. В исследование включено 2242 беременных, прошедших комплексный скрининг в первом триместре с оценкой клинических, биохимических (PAPP-A, PlGF, sFlt-1, sEng), ультразвуковых (PI маточных артерий) и генетических маркеров. Интегральная прогностическая модель продемонстрировала высокую точность (AUC 0,94; чувствительность 87,4 %, специфичность 92,1 %), позволив стратифицировать пациенток на группы риска.

Пациентки высокого риска (n=289) рандомизированы в три группы профилактики: стандартное наблюдение, низкодозированная ацетилсалициловая кислота (АСК, 150 мг/сут) и персонализированная стратегия с учетом патогенетического варианта преэклампсии. Выявлено пять основных вариантов: плацентарный (30,1 %), эндотелиальный (23,5 %), метаболический (18,7 %), иммунологический (14,5 %) и смешанный (13,1 %). Персонализированная профилактика показала значительное превосходство: снижение частоты преэклампсии на 70 % (27,1 % vs 89,7 % в контроле; RR 0,30), тогда как монотерапия АСК обеспечила снижение лишь на 29 % (63,5 %; RR 0,71).



Введение

Презеклампсия остается одной из ведущих причин материнской и перинатальной заболеваемости и смертности во всем мире, затрагивая 2–8 % беременных. Несмотря на постоянное совершенствование стандартов акушерской помощи, частота преэклампсии не демонстрирует тенденции к снижению, а в некоторых регионах отмечается неуклонный рост данной патологии [1; 2]. Современные исследования убедительно демонстрируют, что преэклампсия не является монолитным патологическим состоянием, но представляет собой континуум различных патогенетических вариантов, требующих дифференцированных подходов к диагностике и лечению [3, с. 280; 4, с. 38].

Цель исследования

Разработать и валидировать персонализированный алгоритм прогнозирования риска преэклампсии и оценить эффективность таргетных превентивных мероприятий в различных популяционных группах.

Материалы и методы исследования

Проведено многоцентровое проспективное когортное исследование с последующей рандомизацией пациенток высокого риска в группы различных превентивных стратегий. Исследование проводилось в период с января 2021 по декабрь 2023 года на базе 12 акушерских центров Российской Федерации. В исследование были включены 2387 беременных женщин, обратившихся для постановки на учет по беременности в сроке до 14 недель гестации. После применения критериев исключения окончательная когорта для анализа составила 2242 пациентки.

Методологический подход включал комплексную оценку по четырем кластерам маркеров: анамнести-

Применение персонализированного подхода существенно улучшило клинические исходы. В группе персонализированного ведения частота тяжелых материнских осложнений снизилась с 41,4 % до 11,5 % ($p < 0,001$), продолжительность госпитализации сократилась с 12,7 до 8,5 дней. Перинатальные показатели также улучшились: снижение частоты преждевременных родов до 34 недель (с 33,3 % до 17,2 %; $p = 0,014$), задержки внутриутробного развития (с 31,0 % до 18,4 %; $p = 0,050$) и асфиксии новорожденных (с 26,4 % до 13,8 %; $p = 0,034$).

Исследование подтверждает клиническую ценность дифференцированной тактики на основе патогенетических подтипов преэклампсии, что позволяет оптимизировать ресурсы здравоохранения и снизить материнскую и перинатальную заболеваемость.

Ключевые слова: преэклампсия, персонализация, прогнозирование, профилактика, многоцентровое исследование.

ческие и клинические факторы, биохимические параметры, ультразвуковые маркеры и генетические полиморфизмы. У всех участниц исследования проводился скрининговый тест в 11–14 недель. На основании результатов скрининга пациентки стратифицировались на группы низкого риска (<1 %), промежуточного риска (1–10 %) и высокого риска (>10 %) развития преэклампсии. Пациентки группы высокого риска ($n = 289$) были рандомизированы в соотношении 1:1:1 в три группы превентивных стратегий: группа А ($n = 97$) — стандартное наблюдение; группа Б ($n = 96$) — низкодозированная ацетилсалициловая кислота (150 мг/сут) с 12 до 36 недель; группа В ($n = 96$) — персонализированная профилактика в зависимости от патогенетического варианта риска.

Результаты исследования

Нами был проведен анализ демографических и клинических характеристик пациенток в исследуемой когорте (Таблица 1). Выявлены значимые различия между группами женщин с преэклампсией и с физиологическим течением беременности. В группе преэклампсии отмечался более старший возраст ($33,1 \pm 6,2$ против $28,9 \pm 5,8$ лет, $p < 0,001$), повышенный индекс массы тела ($27,9 \pm 6,2$ против $23,7 \pm 4,8$ кг/м², $p < 0,001$) и исходно более высокое среднее артериальное давление ($91,3 \pm 8,7$ против $82,1 \pm 7,5$ мм рт. ст., $p < 0,001$).

Анализ биохимических и ультразвуковых маркеров I триместра (Таблица 2) продемонстрировал значимые различия между исследуемыми группами. Наиболее выраженные различия отмечались по уровню плацентарного фактора роста (PIGF) и растворимой fms-подобной тирозинкиназы-1 (sFlt-1). Соотношение sFlt-1/PIGF показало наилучшую прогностическую ценность среди отдельных биохимических маркеров с площадью под ROC-кривой 0,81 (95 % ДИ 0,78–0,84).

Мы провели стратификацию пациенток с преэклампсией по патогенетическим вариантам (Таблица 3). Наи-

Таблица 1.
Демографические и клинические характеристики пациенток в исследуемой когорте (n=2242)

Параметр	Общая группа (n=2242)	Группа нормы (n=1953)	Группа преэклампсии (n=289)	p-значение
Возраст, лет (M±SD)	29,7±6,4	28,9±5,8	33,1±6,2	<0,001
ИМТ до беременности, кг/м ² (M±SD)	24,2±5,3	23,7±4,8	27,9±6,2	<0,001
Первородящие, n (%)	1025 (45,7)	896 (45,9)	129 (44,6)	0,721
Курение во время беременности, n (%)	287 (12,8)	238 (12,2)	49 (17,0)	0,027
Преэклампсия в анамнезе, n (%)	198 (8,8)	119 (6,1)	79 (27,3)	<0,001
Семейный анамнез преэклампсии, n (%)	312 (13,9)	219 (11,2)	93 (32,2)	<0,001
Хроническая гипертензия, n (%)	154 (6,9)	98 (5,0)	56 (19,4)	<0,001
Сахарный диабет до беременности, n (%)	67 (3,0)	47 (2,4)	20 (6,9)	<0,001

Параметр	Общая группа (n=2242)	Группа нормы (n=1953)	Группа преэклампсии (n=289)	p-значение
Аутоиммунные заболевания, n (%)	98 (4,4)	73 (3,7)	25 (8,7)	<0,001
Заболевания почек, n (%)	179 (8,0)	134 (6,9)	45 (15,6)	<0,001
Среднее АД в I триместре, мм рт. ст. (M±SD)	83,4±8,2	82,1±7,5	91,3±8,7	<0,001
Использование ВРТ, n (%)	187 (8,3)	147 (7,5)	40 (13,8)	<0,001

большую долю составил плацентарный вариант (30,1 % случаев), характеризующийся повышением пульсационного индекса маточных артерий и снижением уровня плацентарного фактора роста. Данный вариант преобладал среди случаев ранней преэклампсии (53,6 %) и преэклампсии с тяжелыми осложнениями (46,4 %).

При сравнении эффективности различных профилактических стратегий (Таблица 4) в группе стандартного наблюдения частота развития преэклампсии составила 89,7 %. Применение низко дозированной ацетилсалициловой кислоты снизило частоту заболевания до 63,5 % (RR 0,71, 95 % ДИ 0,60–0,84), что соответствует редукции риска на 29 %. Персонализированная профилактика продемонстрировала существенно более высокую эффективность со снижением общей частоты преэкламп-

Таблица 2.
Биохимические и ультразвуковые маркеры в I триместре и их прогностическая значимость (n=2242)

Маркер	Группа нормы (n=1953)	Группа преэклампсии (n=289)	AUC (95% ДИ)	Чувствительность, %	Специфичность, %
PAPP-A, МоМ	1,07 (0,72–1,46)	0,69 (0,41–0,98)	0,67 (0,64–0,71)	58,2	72,3
β-hCG, МоМ	1,04 (0,68–1,57)	1,12 (0,73–1,89)	0,54 (0,51–0,58)	42,1	68,4
PIGF, пг/мл	42,7 (31,9–57,6)	29,1 (18,4–41,2)	0,73 (0,70–0,76)	67,5	74,2
sFlt-1, пг/мл	1687 (1294–2178)	2246 (1795–2897)	0,71 (0,68–0,75)	65,4	72,1
sFlt-1/PIGF	39,8 (27,4–58,7)	78,2 (52,4–117,5)	0,81 (0,78–0,84)	74,8	79,3
sEng, нг/мл	5,2 (4,1–6,7)	7,8 (6,1–9,6)	0,76 (0,73–0,79)	69,2	75,8
PI маточных артерий	1,64 (1,32–2,01)	2,17 (1,83–2,58)	0,78 (0,75–0,81)	72,1	76,4
Среднее АД, мм рт. ст.	82,1 (76,3–88,4)	91,3 (84,5–98,7)	0,75 (0,72–0,78)	68,7	73,5
sFlt-1/PIGF + PI + АД	–	–	0,89 (0,87–0,91)	82,7	85,1
Интегральная модель*	–	–	0,94 (0,92–0,96)	87,4	92,1

*Интегральная модель включает комбинацию клинических, биохимических, ультразвуковых и генетических маркеров. Данные представлены как медиана (межквартильный размах) для непрерывных переменных AUC — площадь под ROC-кривой; ДИ — доверительный интервал; МоМ — кратное медианы

Таблица 3

Распределение женщин по подгруппам риска на основании патогенетических вариантов преэклампсии (n=289)

Патогенетический вариант	Критерии	n (%)	Ранняя ПЭ (n=97)	Поздняя ПЭ (n=192)	ПЭ с тяжелыми осложнениями (n=84)
Плацентарный	↑ PI MA ≥ 95 перцентиль + ↓ PIGF ≤ 5 перцентиль	87 (30,1)	52 (53,6)	35 (18,2)	39 (46,4)
Эндотелиальный	↑ sFlt-1/PIGF > 38 + норма PI MA	68 (23,5)	27 (27,8)	41 (21,4)	25 (29,8)
Метаболический	ИМТ ≥ 30 кг/м ² + инсулинорезистентность*	54 (18,7)	5 (5,2)	49 (25,5)	7 (8,3)
Иммунологический	Аутоантитела к AT1-R и/или аутоиммунные заболевания	42 (14,5)	11 (11,3)	31 (16,1)	10 (11,9)
Смешанный	Сочетание ≥ 2 вариантов	38 (13,1)	2 (2,1)	36 (18,8)	3 (3,6)

*Инсулинорезистентность определялась по индексу HOMA-IR > 2,5 ПЭ — преэклампсия; PI MA — пульсационный индекс маточных артерий; AT1-R — рецептор ангиотензина II 1-го типа

Таблица 4.

Эффективность различных профилактических стратегий в зависимости от патогенетического варианта преэклампсии в группе высокого риска (n=289)

Патогенетический вариант	Стандартное наблюдение (n=97), n (%)	АСК 150 мг/сут (n=96), n (%)	Персонализированная профилактика (n=96), n (%)	RR (95% ДИ) стандарт vs АСК	RR (95% ДИ) стандарт vs персонализированная	p-значение
Плацентарный (n=87)	32/29 (82,8)	21/28 (75,0)	10/30 (33,3)	0,73 (0,59–0,91)	0,40 (0,27–0,61)	<0,001
Эндотелиальный (n=68)	24/23 (82,6)	7/22 (31,8)	4/23 (17,4)	0,38 (0,21–0,72)	0,21 (0,09–0,51)	<0,001
Метаболический (n=54)	18/18 (100)	14/18 (77,8)	5/18 (27,8)	0,78 (0,61–0,99)	0,28 (0,13–0,58)	<0,001
Иммунологический (n=42)	12/13 (92,3)	10/14 (71,4)	4/15 (26,7)	0,77 (0,55–1,09)	0,29 (0,12–0,70)	<0,001
Смешанный (n=38)	11/14 (78,6)	9/14 (64,3)	3/10 (30,0)	0,82 (0,52–1,29)	0,38 (0,14–1,05)	0,041
Всего (n=289)	87/97 (89,7)	61/96 (63,5)	26/96 (27,1)	0,71 (0,60–0,84)	0,30 (0,21–0,43)	<0,001

АСК — ацетилсалициловая кислота; RR — относительный риск; ДИ — доверительный интервал

сии до 27,1 % (RR 0,30, 95 % ДИ 0,21–0,43), что соответствует редукции риска на 70 %.

Анализ материнских и перинатальных исходов (Таблица 5) продемонстрировал значимые преимущества персонализированного подхода к ведению преэклампсии. Частота тяжелых материнских осложнений была существенно ниже в группе персонализированного ведения (11,5 % против 41,4 %, p < 0,001). Перинатальные исходы также демонстрировали более благоприятную картину в группе персонализированного ведения.

Заключение

Проведенное исследование продемонстрировало эффективность персонализированного подхода к прогнозированию, профилактике и лечению преэклампсии. Разработанная интегральная модель прогнозирования риска, включающая клинические, биохимические, ультра-

тразвуковые и генетические маркеры, показала высокую прогностическую ценность с чувствительностью 87,4 % и специфичностью 92,1 %.

Выявленная гетерогенность патогенетических вариантов преэклампсии подтверждает необходимость дифференцированного подхода к профилактике и лечению. Плацентарный вариант преобладал среди случаев ранней преэклампсии (53,6 %) и ассоциировался с наиболее неблагоприятными исходами. Частота тяжелых материнских осложнений в группе персонализированного ведения составила 11,5 % против 41,4 % в группе стандартного подхода, что соответствует снижению риска на 82 %. Средняя длительность госпитализации сократилась с 12,7 до 8,5 дней. Перинатальные исходы также демонстрировали более благоприятную динамику со снижением частоты преждевременных родов до 34 недель с 33,3 % до 17,2 %, задержки внутриутробного развития с 31,0 % до 18,4 % и асфиксии при рождении с 26,4 %

Таблица 5.
Материнские и перинатальные исходы в зависимости от стратегии ведения преэклампсии (n=174)

Исход	Стандартное ведение (n=87)	Персонализированное ведение (n=87)	OR (95% ДИ)	p-значение
Материнские исходы				
Эклампсия, n (%)	7 (8,0)	2 (2,3)	0,27 (0,05–1,34)	0,087
HELLP-синдром, n (%)	9 (10,3)	3 (3,4)	0,31 (0,08–1,19)	0,075
Отслойка плаценты, n (%)	6 (6,9)	1 (1,1)	0,16 (0,02–1,35)	0,057
Острое повреждение почек, n (%)	12 (13,8)	3 (3,4)	0,22 (0,06–0,82)	0,016
Отек легких, n (%)	5 (5,7)	1 (1,1)	0,19 (0,02–1,68)	0,097
Инсульт, n (%)	2 (2,3)	0 (0)	–	0,156
Потребность в ИВЛ, n (%)	4 (4,6)	0 (0)	–	0,043
Материнская смертность, n (%)	1 (1,1)	0 (0)	–	0,316
Любое тяжелое осложнение, n (%)	36 (41,4)	10 (11,5)	0,18 (0,08–0,40)	<0,001
Длительность госпитализации, дни (M±SD)	12,7±5,2	8,5±3,6	–	<0,001
Перинатальные исходы				
Преждевременные роды <34 нед, n (%)	29 (33,3)	15 (17,2)	0,42 (0,21–0,85)	0,014
Преждевременные роды <37 нед, n (%)	51 (58,6)	34 (39,1)	0,45 (0,25–0,84)	0,010

Исход	Стандартное ведение (n=87)	Персонализированное ведение (n=87)	OR (95% ДИ)	p-значение
ЗВУР плода, n (%)	27 (31,0)	16 (18,4)	0,50 (0,25–1,01)	0,050
Асфиксия при рождении, n (%)	23 (26,4)	12 (13,8)	0,44 (0,21–0,95)	0,034
Респираторный дистресс-синдром, n (%)	19 (21,8)	10 (11,5)	0,47 (0,20–1,07)	0,068
Неонатальный сепсис, n (%)	8 (9,2)	4 (4,6)	0,48 (0,14–1,64)	0,232
Внутрижелудочковое кровоизлияние, n (%)	6 (6,9)	2 (2,3)	0,32 (0,06–1,62)	0,146
Перинатальная смертность, n (%)	5 (5,7)	1 (1,1)	0,19 (0,02–1,68)	0,097
Оценка по Апгар на 5 мин <7, n (%)	18 (20,7)	7 (8,0)	0,34 (0,13–0,84)	0,017
Госпитализация в ОРИТН, n (%)	38 (43,7)	22 (25,3)	0,44 (0,23–0,83)	0,011
Длительность пребывания в ОРИТН, дни (M±SD)	8,2±6,3	5,4±4,1	–	<0,001

OR — отношение шансов; ДИ — доверительный интервал; ЗВУР — задержка внутриутробного развития плода; ОРИТН — отделение реанимации и интенсивной терапии новорожденных

до 13,8 %. Внедрение разработанного алгоритма в клиническую практику имеет потенциал для значимого снижения заболеваемости и смертности, связанной с преэклампсией, а также для оптимизации использования ресурсов здравоохранения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ananth C.V., Keyes K.M., Wapner R.J. Pre-eclampsia rates in the United States, 1980–2010: age-period-cohort analysis. *BMJ*. 2013;347. DOI: 10.1136/bmj.f6564
2. Bartsch E., Medcalf K.E., Park A.L., Ray J.G. Clinical risk factors for pre-eclampsia determined in early pregnancy: systematic review and meta-analysis of large cohort studies. *BMJ*. 2016;353. DOI: 10.1136/bmj.i1753
3. Phipps E.A., Thadhani R., Benzing T., Karumanchi S.A. Pre-eclampsia: pathogenesis, novel diagnostics, and therapies. *Nat Rev Nephrol*. 2019;15(5):275–289. DOI: 10.1038/s41581-019-0119-6
4. Brown M.A., Magee L.A., Kenny L.C., et al. Hypertensive Disorders of Pregnancy: ISSHP Classification, Diagnosis, and Management Recommendations for International Practice. *Hypertension*. 2018;72(1):24–43. DOI: 10.1161/HYPERTENSIONAHA.117.10803
5. Lisonkova S., Joseph K.S. Incidence of preeclampsia: risk factors and outcomes associated with early— versus late-onset disease. *Am J Obstet Gynecol*. 2013;209(6): 544.e1–544.e12. DOI: 10.1016/j.ajog.2013.08.019
6. Zeisler H., Llurba E., Chantraine F., et al. Predictive Value of the sFlt-1

7. Ratio in Women with Suspected Preeclampsia. *N Engl J. Med.* 2016;374(1):13–22. DOI: 10.1056/NEJMoa1414838 Rolnik DL, Wright D, Poon L.C., et al. Aspirin versus Placebo in Pregnancies at High Risk for Preterm Preeclampsia. *N Engl J Med.* 2017;377(7):613–622. DOI: 10.1056/NEJMoa1704559
8. Chappell L.C., Cluver C.A., Kingdom J., Tong S. Pre-eclampsia. *Lancet.* 2021;398(10297):341–354. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)32335-7
9. Bujold E., Roberge S., Lacasse Y., et al. Prevention of Preeclampsia and Intrauterine Growth Restriction with Aspirin Started in Early Pregnancy: A Meta-Analysis. *Obstet Gynecol.* 2010;116(2):402–414. DOI: 10.1097/AOG.0b013e3181e9322a
10. Sovio U., White I.R., Dacey A., Pasupathy D., Smith G.C.S. Screening for fetal growth restriction with universal third trimester ultrasonography in nulliparous women in the Pregnancy Outcome Prediction (POP) study: a prospective cohort study. *Lancet.* 2015;386(10008):2089–2097. DOI: 10.1016/S0140-6736(15)00131-2
11. Hoffman M.K., Goudar S.S., Kodkany B.S., et al. Low-dose aspirin for the prevention of preterm delivery in nulliparous women with a singleton pregnancy (ASPIRIN): a randomised, double-blind, placebo-controlled trial. *Lancet.* 2020;395(10220):285–293. DOI: 10.1016/S0140-6736(19)32973-3
12. Steegers E.A., von Dadelszen P., Duvekot J.J., Pijnenborg R. Pre-eclampsia. *Lancet.* 2010;376(9741):631–644. DOI: 10.1016/S0140-6736(10)60279-6
13. Akolekar R., Syngelaki A., Poon L., Wright D., Nicolaides K.H. Competing risks model in early screening for preeclampsia by biophysical and biochemical markers. *Fetal Diagn Ther.* 2013;33(1):8–15. DOI: 10.1159/000341264
14. Rana S., Lemoine E., Granger J.P., Karumanchi S.A. Preeclampsia: Pathophysiology, Challenges, and Perspectives. *Circ Res.* 2019;124(7):1094–1112. DOI: 10.1161/CIRCRESAHA.118.313276
15. Roberge S., Nicolaides K.H., Demers S., Villa P., Bujold E. Prevention of perinatal death and adverse perinatal outcome using low-dose aspirin: a meta-analysis. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2013;41(5):491–499. DOI: 10.1002/uog.12421
16. Poon L.C., Shennan A., Hyett J.A., et al. The International Federation of Gynecology and Obstetrics (FIGO) initiative on pre-eclampsia: A pragmatic guide for first-trimester screening and prevention. *Int J Gynaecol Obstet.* 2019;145 Suppl 1:1–33. DOI: 10.1002/ijgo.12802
17. Abalos E., Cuesta C., Grosso A.L., Chou D., Say L. Global and regional estimates of preeclampsia and eclampsia: a systematic review. *Eur J Obstet Gynecol Reprod Biol.* 2013;170(1):1–7. DOI: 10.1016/j.ejogrb.2013.05.005.

© Классов Алибек Мурзабекович (Alibekklassov1989@gmail.com); Немцева Лада Андреевна (Soul339@mail.ru);
Веснина Олеся Вячеславовна (Vesninaol64@mail.ru); Генина Вероника Александровна (v.genina@inbox.ru);
Иващенко Виктория Владимировна (Ivashenko.viktoria@yandex.ru); Попова Екатерина Алексеевна (katerina_porova2702@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПОЛНЫЙ МЕТАБОЛИЧЕСКИЙ ОТВЕТ ПРИ ПЕРВИЧНО-МНОЖЕСТВЕННОМ РАКЕ НА ФОНЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕРАПИИ: РОЛЬ СИНЕРГИИ ИММУНОТЕРАПИИ, ТАРГЕТНОЙ И ХИМИОТЕРАПИИ

COMPLETE METABOLIC RESPONSE IN PRIMARY MULTIPLE CANCER AGAINST THE BACKGROUND OF COMBINATION THERAPY: THE ROLE OF SYNERGY OF IMMUNOTHERAPY, TARGETED AND CHEMOTHERAPY

**R. Murashko
Yu. Makarova
A. Kozlova
A. Gorkovoy
D. Andreev**

Summary. The problem of primary tumor multiplicity is relevant in modern clinical oncology due to the growing number of patients with multiple malignancies. Multiple primary malignancies are a clinical situation that requires an individualized approach to treatment. The results of therapy depend on the prevalence of the process, the stage of occurrence of tumors, and the patient's reserve capabilities. The article presents a clinical case of a patient with multiple primary malignancies, including colon adenocarcinoma, large B-cell lymphoma, and non-small cell lung cancer, with the achievement of a complete metabolic response against the background of combined immune-chemotherapy.

Keywords: synchronous-metachronous primary multiple tumors, non-small cell lung cancer, colon adenocarcinoma, large-cell B-cell lymphoma, immunotherapy.

Мурашко Роман Алексеевич

доктор медицинских наук, главный врач,
ГБУЗ «Клинический онкологический диспансер №1»,
главный внештатный специалист онколог,
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
медицинский университет», г. Краснодар
kkod@kkod.ru

Макарова Юлия Михайловна

врач-онколог высшей квалификационной категории,
заведующая, отделение противоопухолевой
лекарственной терапии №1 ГБУЗ «Клинический
онкологический диспансер №1», г. Краснодар
best.makarova@gmail.com

Козлова Анастасия Геннадьевна

врач-онколог второй категории,
отделение противоопухолевой лекарственной
терапии №1 ГБУЗ «Клинический онкологический
диспансер №1», г. Краснодар
onko.medik@mail.ru

Горьковой Андрей Викторович

кандидат медицинских наук, врач-эндоскопист
высшей квалификационной категории, заведующий,
эндоскопическое отделение ГБУЗ «Клинический
онкологический диспансер №1», г. Краснодар
muse10@list.ru

Андреев Дмитрий Валерьевич

врач-рентгенолог высшей квалификационной
категории ГБУЗ «Клинический онкологический
диспансер №1»;
ассистент, №2 ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
медицинский университет», г. Краснодар
dvandr2017@yandex.ru

Аннотация. Проблема первичной множественности опухолей приобретает всё большую актуальность в современной клинической онкологии, что обусловлено неуклонным ростом заболеваемости пациентов со злокачественными новообразованиями различной локализации. Первично-множественные злокачественные опухоли (ПМЗО) — клиническая ситуация, требующая индивидуализированного подхода к лечению. Результаты терапии зависят от распространенности процесса, этапности возникновения опухолей и резервных возможностей пациента. В статье представлен клинический случай пациента с ПМЗО, включающим аденокарциному ободочной кишки, крупноклеточную В-клеточную лимфому и немелкоклеточный рак легкого, с достижением полного метаболического ответа на фоне комбинированной иммунохимиотерапии.

Ключевые слова: синхронно-метахронные первично-множественные опухоли, немелкоклеточный рак легкого, аденокарцинома ободочной кишки, крупноклеточная В-клеточная лимфома, иммунотерапия.

Введение

Первично-множественные злокачественные опухоли (ПМЗО) представляют значительную проблему в онкологии. В России в 2023 г. зарегистрировано 77433 случая ПМЗО, что составляет 11,5 % от всех впервые выявленных злокачественных новообразований [1].

Критерии ПМЗО включают гистологическое подтверждение злокачественности каждой опухоли, их анатомическую разделенность и исключение метастатического происхождения [2].

Развитие ПМЗО может быть синхронным (интервал ≤ 6 месяцев) или метасинхронным (> 6 месяцев). Рост заболеваемости связан с увеличением продолжительности жизни, улучшением диагностики и накоплением канцерогенных воздействий [3].

Материалы и методы

Клиническое наблюдение. Пациент 1959 года рождения. В 2009 году диагностирован семейный аденоматоз толстой кишки (мутация гена APC). В 2021 году выявлена аденокарцинома ободочной кишки (pT1N0M0).

В декабре 2023 года диагностированы крупноклеточная В-клеточная лимфома желудка (non-GCB подтип) и мелкоклеточный рак легкого (T4N1M1b, IVA стадия).

Методы диагностики: фиброколоноскопия; эзофагогастродуоденоскопия; позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с компьютерной томографией (ПЭТ/КТ); гистологическое и иммуногистохимическое исследования.

Лечение: комбинированная терапия (атезолизумаб + бевацизумаб + паклитаксел + карбоплатин) с переходом на поддерживающий режим.

Результаты

Динамика опухолевого процесса: полный метаболический ответ по данным ПЭТ/КТ (рис. 5–7).

Переносимость терапии: удовлетворительная (ECOG 0).

Обсуждение

Применение схемы атезолизумаб + бевацизумаб + химиотерапия позволило достичь полного метаболического ответа у пациента с тремя первичными опухолями. Эффективность в терапии мелкоклеточного рака легкого обусловлена синергией иммунотерапии и антиангиогенного препарата, что соответствует рекомендациям Минздрава РФ [4].

Заключение

Клинический случай демонстрирует возможность достижения длительной ремиссии при ПМЗО благодаря персонализированному подходу. Комбинированная иммунохимиотерапия является перспективным направлением в лечении множественных злокачественных новообразований.

Клиническое наблюдение

Пациент 1959 года рождения обратился в 2009 году в поликлинику по месту жительства с жалобами на боли в животе, хроническую диарею, наличие слизи и крови в кале. При проведении фиброколоноскопии (ФКС) выявлены полипы в ободочной кишке. При подозрении на семейный аденоматоз выполнено молекулярно-генетическое исследование, подтверждающее мутацию в гене APC. Пациенту выполнена левосторонняя гемиколэктомия (ЛГКЭ) в связи с выявленным диффузным семейным полипозом, после чего он продолжил динамическое амбулаторное наблюдение.

В марте 2021 года в ходе планового контрольного обследования зафиксирован рецидив заболевания с формированием множественных полипозных структур в кишечнике. Выполнена резекция поперечного отдела ободочной кишки. Патолого-гистологическое исследование (ПГИ) — аденокарцинома низкой степени злокачественности (grade I по черырехступенчатой системе) с ростом на фоне тубуло-ворсинчатой аденомы с инвазией в основание полипа (IV уровень по Haggitt малигнизированных полипов). Инвазия достигает основания полипа (субмукозный слой стенки кишки), но не затрагивает мышечный слой (muscularis propria). Опухоль в пределах слизистой (mucosa) и подслизистого слоя (submucosa), без прорастания в мышечный слой, метастазов в регионарных лимфоузлах нет, отдаленные метастазы отсутствуют. Классификация TNM: pT1pN0M0, что соответствует 1 стадии рака толстой кишки [5].

Данные диагностического наблюдения ФКС и компьютерной томографии органов грудной клетки, органов брюшной полости и органов малого таза (КТ ОГК, ОБП, ОМТ) на протяжении 2021–2023 годов свидетельствуют о стабильных диффузных изменениях во внутренних органах, стабилизация очагов фиброза и не увеличенных внутригочечных лимфоузлов. Продолжается процесс множественного формирования полипов ободочной кишки. Рекомендована эндоскопическая полипэктомия (ЭПЭ) полипов в плановом порядке (Табл.1)

В декабре 2023 года появились жалобы на дискомфорт при глотании, боли в области желудка. Проведена фиброгастродуоденоскопия (ФГДС). Диагностирован дистальный катаральный эзофагит, функциональная не-

Таблица 1.
Эндоскопическая полипэктомия полипов

дата	ЭПЭ	Международная классификация болезней — онкология (МКБ-0) [6]
Июнь 2021 г.	Эндоскопическое удаление полипа толстой кишки	8211/0 Тубулярная аденома. Дисплазия низкой степени (low grade).
Март 2022 г.	Эндоскопическое удаление полипов прямой кишки и ректосигмоидного отдела кишки	8210/0 Аденоматозный полип. 8211/0 Тубулярная аденома. Дисплазия высокой степени (high grade).
Ноябрь 2023 г.	Эндоскопическое удаление полипов нисходящего отдела ободочной кишки	8263/0 Тубулярно-ворсинчатая аденома. Дисплазия низкой степени (low grade). 8140/3 Аденокарцинома высокодифференцированная. Градация G1

достаточность кардии. Обнаружена эндофитная форма роста опухоли в средней трети тела желудка. По данным ПГИ морфологическая картина и иммунофенотип опухоли в биоптатах соответствует В-клеточной крупноклеточной лимфоме, поп — GCB подтип, код по МКБ-О 9680/3: В-клеточная лимфома, не классифицируемая, с чертами, промежуточными между диффузной В-крупноклеточной лимфомой (ДВКЛ) и лимфомой Беркитта [7]. Non-GCB подтип ДВКЛ обычно имеет худший прогноз по сравнению с GCB подтипом. [8]. В-клеточные крупноклеточные лимфомы составляют приблизительно 30 % от всех случаев неходжкинских лимфом и является одной из самых частых и агрессивных лимфом в мире [9].

Так же в декабре 2023 года по данным ПЭТ/КТ ОГК в обоих легких обнаружены множественные гематогенные очаговые образования с максимальными размерами в S6 и S10 (23 x 18 мм) правого легкого с гипер-



Рис. 2. ПЭТ/КТ от 15.12.2023г. Очаги в левом легком

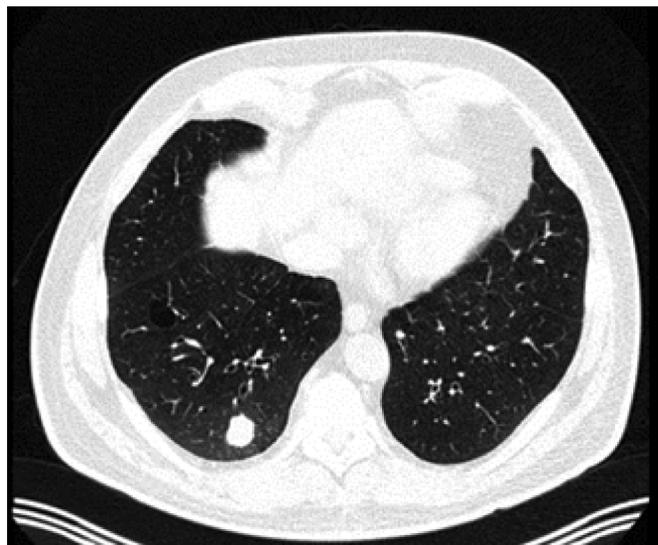


Рис. 1. КТ-снимок от 15.12.2023 г.
Очаг в S10 правого легкого

фиксацией ФДГ (фтордезоксиглюкоза, 18F) с SUV max 19,62 — под вопросом первичное периферическое образование правого легкого. (Рис. 1)

Отдаленные множественные очаги в левом легком: S8, S9, S10 с фиксацией ФДГс SUV max 6,62 (Рис. 2) и очаг в S2 правого легкого 5 мм, SUV max 2,58.

В стенке желудка отмечается очаговая гиперфиксация ФДГ на уровне пилорического отдела с SUV max 9,73 (Рис. 3)

В стенке тонкой кишки определяются очаги с гиперфиксацией ФДГ с SUV max 5,81 без достоверных структурных изменений по данным нативной КТ. Аналогичный очаг отмечается на уровне правой подвздошной области с SUV max 5,90 (Рис. 4)

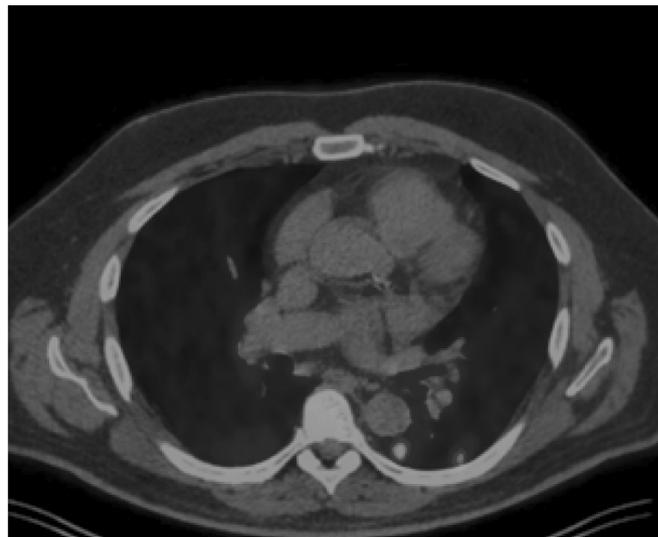




Рис. 3. ПЭТ/КТ от 15.12.2023 г. Очаговая гиперфиксация ФДГ в стенке желудка

Проведена VATS справа — атипичная резекция S6, S10 легкого. (Video-Assisted Thoracoscopic Surgery — вид малоинвазивной торакальной хирургии). По данным ПГИ диагностирована умеренно-дифференцированная ацинарная аденокарцинома нижней доли правого легкого без инвазии в висцеральную плевру. Край резекции без опухолевого роста. Лимфоваскулярная, экстрамуральная венозная и периневральная инвазии отсутствуют. Код МКБ-О: 8551/3 Ацинарно-клеточная цист-аденокарцинома. На основании результатов патолого-гистологического исследования (ПГИ) и данных комплексного инструментального обследования верифицирован диагноз: немелкоклеточный рак легкого, T4N1M1b (IVA стадия по классификации TNM) [4].



Рис. 4. ПЭТ/КТ от 15.12.2023 г. Гиперфиксация ФДГ в стенке кишечника

Молекулярно-генетический анализ опухоли не выявил значимых мутаций в генах BRAF и EGFR. Иммуногистохимическое исследование подтвердило отрицательный статус экспрессии ALK и ROS1. При этом выявлена выраженная позитивность PD-L1 с высоким уровнем экспрессии (TPS ≥ 50 % опухолевых клеток).

Врачебным консилиумом рекомендована лекарственная терапия в индукционной дозе 1 раз в 3 недели по схеме: атезолизумаб 1200 мг + бевацизумаб 15 мг/кг + паклитаксел 200 мг/м² + карбоплатин AUC 6. После четырех циклов с апреля 2024 года пациент переведен на поддерживающий курс терапии по схеме: атезолизумаб 1200 мг + бевацизумаб 15 мг/кг 1 раз в 3 недели. Динамика противоопухолевого процесса на фоне лекарственной терапии под контролем диагностических данных представлена в таблице (Табл. 2)

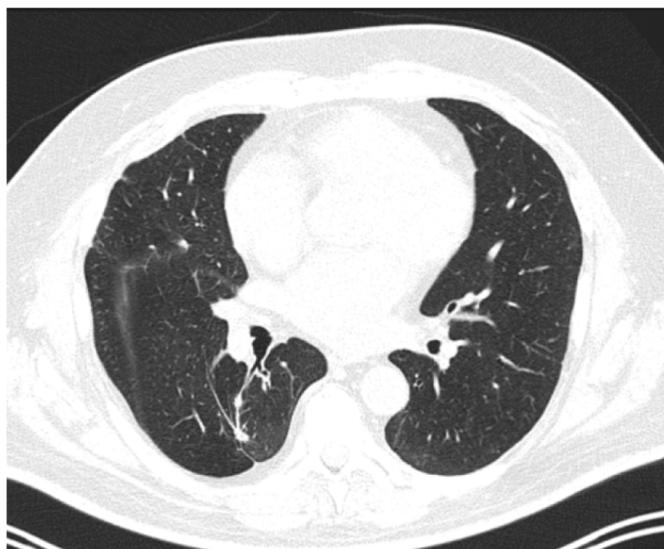


Рис. 5. ПЭТ/КТ от 26.04.2024 г. Регресс в S9 и S10 левого легкого

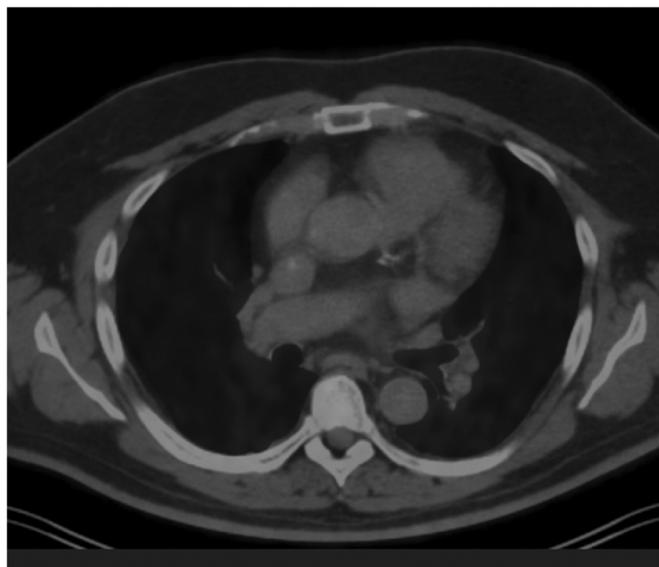


Таблица 2.

Диагностическое наблюдение пациента на фоне лекарственной терапии

апрель 2024 г.	Фиброколоноскопия (ФКС)	Состояние после обструктивной левосторонней ГКЭ, реконструктивно-восстановительной операции, клиновидной резекции поперечного отдела ободочной кишки и ЭПЭ полипов ободочной кишки. Поверхностный колит. Положительная динамика полипов толстой кишки.
апрель 2024 г.	Эзофагогастродуоденоскопия (ЭГДС). Биопсия	Дистальный катаральный эзофагит, функциональная недостаточность кардии. Ремиссия лимфомы желудка (опухоль подверглась резорбции). Грубый рубец средней трети тела желудка. Биопсия (ПГИ без опухолевого роста).
апрель 2024 г.	ПЭТ/КТ в сравнении с ПЭТ/КТ от 15.12.2023г.	Отмечается уменьшение количества очаговых образований в обоих легких, а также уменьшение размеров очагов. Регресс в S9 и S10 левого легкого. В S8 левого легкого уменьшение очага до 5 мм (ранее 6 мм) без повышенной фиксации ФДГ. В S2 правого легкого уменьшение очага до 2 мм (ранее 5 мм) без повышенной фиксации ФДГ (Рис. 5) Регресс очага в стенке желудка с фоновой фиксацией ФДГ SUV max 1,41 (Рис. 6). Регресс очаговой гиперфиксации ФДГ в стенке кишечника. (Рис. 7). Оценка положительной динамики с частичным ответом опухолевого процесса с учетом стандартизированных шкал по RECIST 1.1[10].
июль 2024 г.	ПЭТ-КТ в сравнении с ПЭТ-КТ от 26.04.2024г.	Уменьшение участка консолидации паренхимы легкого с низкой диффузной фиксацией ФДГ. Стабильные очаговые образования обоих легких: в S8 левого легкого до 5 мм, в S2 правого легкого до 2 мм без повышенной метаболической активности ФДГ.
август 2024 г.	ФКС	Поверхностный колит. Полная резорбция полипов толстой кишки на фоне лекарственной терапии
август 2024 г.	ФГДС	Сохраняется функциональная недостаточность кардии. Лимфома желудка (полная резорбция опухоли).
сентябрь 2024 г.	МРТ головного мозга	Прогрессирование опухолевого процесса в головном мозге не получено. Очаговые изменения вещества мозга дистрофического (сосудистого) характера. Оценка динамики опухолевого процесса выполнена с учетом стандартизированных шкал по RANO — прогрессирование процесса не выявлено.
октябрь 2024 г.	ПЭТ-КТ в сравнении с ПЭТ-КТ от 23.07.2024	В обоих легких повышенная фиксация ФДГ не выявлена. Паренхима легких пневматизирована равномерно без инфильтративных изменений. В плевральных полостях и полости перикарда экссудата нет. Лимфатические узлы средостения не увеличены, без повышенной фиксации ФДГ. Полный метаболический ответ. Оценка динамики с учетом стандартизированных шкал по RECIST 1.1[10].
Февраль 2025 г.	ПЭТ-КТ в сравнении с ПЭТ-КТ от 17.10.2024г.	Сохраняется регресс очага в стенке желудка и в стенке кишечника без метаболической активности, а также полный метаболический ответ в обоих легких. Оценка динамики с учетом стандартизированных шкал по RECIST 1.1 представлена на диагностических ПЭТ/КТ снимках (Рис. 8)

Отсутствие повышенной фиксации ФДГ.

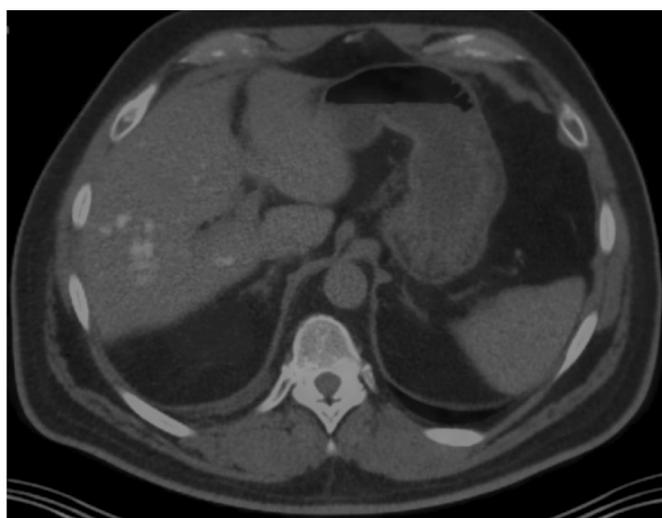


Рис. 6. ПЭТ/КТ от 26.04.2024г. Регресс очаговой гиперфиксации ФДГ в стенке желудка



Рис. 7. ПЭТ/КТ от 26.04.2024г. Регресс очаговой гиперфиксации ФДГ в стенке кишечника

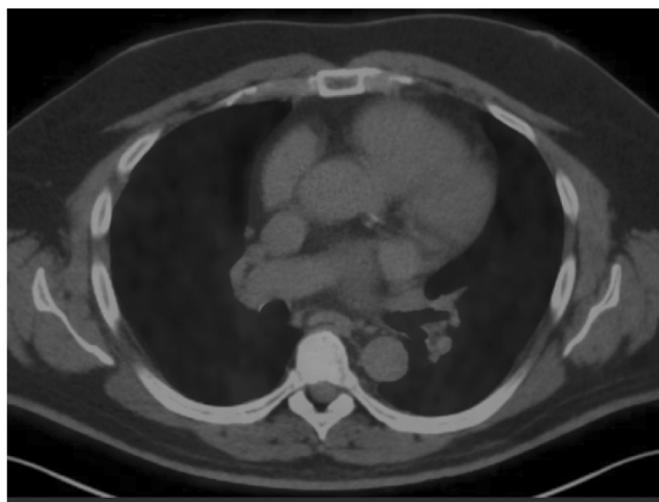


Рис. 8. ПЭТ/КТ от 17.02.2025 г. Сохраняется полный метаболический ответ в легких

Пациент находится под динамическим наблюдением в отделении противоопухолевой лекарственной терапии №1 ГБУЗ «Клинический онкологический диспансер №1» МЗ Краснодарского края (г. Краснодар). По состоянию на февраль 2025 года завершено проведение 26 циклов противоопухолевой терапии. На основании данных ПЭТ/КТ, подтверждающих полный метаболический ответ, принято решение о продолжении лечения в рамках поддерживающего режима с сохранением текущей схемы. Контрольные обследования запланированы с периодичностью 3 месяца [4]. Терапия характеризуется удовлетворительной переносимостью. Соматический статус пациента соответствует 0 баллам по шкале ECOG (полная активность).

Заключение

Проблема первичной множественности злокачественных новообразований сохраняет высокую актуальность в современной онкологической практике, что обусловлено неуклонным ростом частоты случаев синхронных и метастатических опухолей. Данная категория пациентов характеризуется крайне неблагоприятным прогнозом, где вторичные неоплазии становятся ключевым фактором летальности. В представленном клиническом наблюдении у пациента с верифицированным в марте 2021 года колоректальным раком (T3N0M0) в декабре

2023 года диагностирован метастатический генез множественных неоплазий: В-крупноклеточная лимфома и немелкоклеточный рак легкого (T2aN1M0). Интервал между манифестацией первой и последующих опухолей составил 34 месяца, что соответствует критериям метастатичности.

На фоне комбинированной терапии по схеме: атезолизумаб (1200 мг) + бевацизумаб (15 мг/кг) + паклитаксел (200 мг/м²) + карбоплатин (AUC 6) с последующим переходом на поддерживающий режим (атезолизумаб + бевацизумаб) достигнут полный метаболический ответ по данным ПЭТ/КТ (октябрь 2024 г.), сохраняющийся в течение 6 месяцев (по состоянию на апрель 2025 г.) для всех трёх нозологических форм. Пациент завершил 26 циклов лечения с удовлетворительной переносимостью и сохранённым индексом ECOG 0.

Выбор терапевтической стратегии основан на доказанной эффективности комбинации атезолизумаба с бевацизумабом и химиотерапией при немелкоклеточном раке легкого. Данный протокол обеспечивает синергию иммунотерапевтического, антиангиогенного и цитотоксического эффектов, что в данном случае позволило достичь длительной ремиссии с сохранением качества жизни пациента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каприн А.Д., Старинский В.В., Шахзадова А.О. Состояние онкологической помощи населению России в 2023 году. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена, 2024.
2. Ганцев Ш.Х., Мерабишвили В.М., Куликов Е.П. Распространенность первично-множественных опухолей. Российский онкологический журнал. 1998; 5:4–7.
3. Bittorf V., Kessler H., Merkel S. Multiple primary malignancies // Eur. J. Cancer. 2001. Vol. 37. P. 302–313. DOI: 10.1016/S0959-8049(00)00369-1.
4. Клинические рекомендации «Злокачественное новообразование бронхов и легкого» [Электронный ресурс]. Утв. Минздравом РФ 31 мая 2021 г. URL: <https://www.rosminzdrav.ru> (дата обращения: 15.10.2023).
5. Клинические рекомендации «Злокачественное новообразование ободочной кишки» [Электронный ресурс]. Утв. Минздравом РФ 12 декабря 2022 г. URL: <https://www.rosminzdrav.ru> (дата обращения: 15.10.2023).
6. Фритц Э., Перси К., Джек Э., Шанмугаратнам К., Собин Л., Паркин Д.М., Уилан Ш. Международная классификация болезней — онкология (МКБ-0). 3-е изд. / Пер. с англ. А.В. Филочкиной; под ред. А.М. Беляева, О.Ф. Чепика, А.С. Артемьевой, А.А. Барчука, Ю.И. Комарова. СПб.: Издательство «Вопросы онкологии», 2017. 352 с.
7. Клинические рекомендации «Диффузная В-крупноклеточная лимфома» [Электронный ресурс]. Утв. Минздравом РФ 10 апреля 2022 г. URL: <https://cr.minzdrav.gov.ru> (дата обращения: 15.10.2023).
8. Laurie H. Sehn, Gilles Salles. (2021). Diffuse Large B-Cell Lymphoma. N Engl J Med. 384, 842–858
9. Steven H. Swerdlow, Elias Campo, Stefano A. Pileri, Nancy Lee Harris, Harald Stein, et. al. (2016). The 2016 revision of the World Health Organization classification of lymphoid neoplasms. Blood. 127, 2375–2390
10. Eisenhauer E.A., Therasse P., Bogaerts J. et al. new response evaluation criteria in solid tumours: Revised RECIST guideline (version 1.1) // European Journal of Cancer. 2009. Vol. 45, no. 2. P. 228–247. DOI: 10.1016/j.ejca.2008.10.026.

© Мурашко Роман Алексеевич (kkod@kkod.ru); Макарова Юлия Михайловна (best.makarova@gmail.com);
Козлова Анастасия Геннадьевна (onko.medik@mail.ru); Горьковой Андрей Викторович (muse10@list.ru);
Андреев Дмитрий Валерьевич (dvandr2017@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

НЕЙРОВОСПАЛЕНИЕ В ПАТОГЕНЕЗЕ ПОСТКОВИДНОГО СИНДРОМА (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ) ЧАСТЬ II

NEUROINFLAMMATION IN THE PATHOGENESIS OF POST-COVID SYNDROME (LITERATURE REVIEW) PART II

I. Nikiforov
T. Chernobrovkina
G. Kostyuk
L. Burigina
M. Belova
V. Istomina
R. Kardashyan
S. Igumnov

Summary. Neuroinflammation is a universal adaptive response of the nervous tissue to damage of any origin (infectious, mechanical, toxic, hypoxic, etc.). Its function is adaptation to damage, disruption of homeostasis and stimulation of regenerative processes. In conditions when the inflammatory reaction acquires a large scale (cytokine storm) becomes (in response to a stimulus) uncontrollable, it can itself lead to damage of the brain. In the clinical setting, it becomes relevant to control this process using biomarkers of neuroinflammation and to use their multifunctionality and multilevel interaction to enhance anti-inflammatory mechanisms.

Keywords: neuroinflammation, microglia, DAM-phenotype, cytokines, chemokines, astrogliosis, biomarkers of inflammation, proteases, glutamate, adhesion molecules.

Никифоров Игорь Анатольевич

доктор медицинских наук, профессор,
Академия постдипломного образования
ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр
специализированных видов медицинской помощи
и медицинских технологий» Федерального
медико-биологического агентства России»
narkolog.ipk@mail.ru

Чернобровкина Тамара Васильевна

доктор медицинских наук, профессор,
Академия постдипломного образования
ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр
специализированных видов медицинской помощи
и медицинских технологий» Федерального
медико-биологического агентства России»
narkolog.ipk@mail.ru

Костюк Георгий Петрович

доктор медицинских наук, профессор, главный врач
ГБУЗ г. Москвы, «Психиатрическая клиническая
больница № 1 им. Н.А. Алексеева»
pkb1@zdrav.mos.ru

Бурьгина Лариса Андреевна

кандидат медицинских наук, главный врач ГБУЗ г. Москва
«Психиатрическая клиническая больница № 4
им. П.Б. Ганнушкина»
pkb4@zdrav.mos.ru

Белова Майя Юрьевна

врач-психиатр, заведующий филиалом
«Психиатрический стационар им. В.А. Гиляровского»
ГБУЗ г. Москвы, «Психиатрическая клиническая больница
№ 4 им. П.Б. Ганнушкина»
pkb4-pb3@zdrav.mos.ru

Истомина Виктория Витальевна

врач-психиатр, заведующий общепсихиатрическим
отделением № 19 «Психиатрического стационара
им. В.А. Гиляровского» — филиала Государственного
бюджетного учреждения здравоохранения, г. Москва
«Психиатрическая клиническая больница
№ 4 им. П.Б. Ганнушкина»
pkb4-pb3@zdrav.mos.ru

Кардашян Руслан Антраникович

доктор медицинских наук, профессор, ФНМО
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов
имени Патриса Лумумбы»
rakar_26@mail.ru

Игумнов Сергей Александрович

доктор медицинских наук, профессор, Российский
национальный исследовательский медицинский
университет им. Н.И. Пирогова
igumnov_sa@rsmu.ru



В первой части настоящего литературного обзора описаны: история дефиниции постковидного синдрома, структура его «неврологического» профиля, пути проникновения SARS-Cov-2 в головной мозг.

Во второй части обзора представлена информация о сложных механизмах нейровоспаления, его участниках, способах их взаимодействия и плазменных маркерах этого процесса.

Нейровоспаление

Нейровоспаление — неотъемлемый компонент самых разных патологических состояний центральной нервной системы, включая острые и нейродегенеративные психические заболевания.

Причинно-следственные взаимосвязи между нейровоспалением и повреждением мозга при заболеваниях ЦНС исследованы пока недостаточно, вместе с тем, нейровоспаление принято считать нейродеструктивным фактором.

Многие предикторы воспаления могут оказывать как прямое токсическое действие, вызывая гибель нейронов, так и способны приводить к повреждению мозга, опосредованному развитием отека, ишемии и ангиоспазма [1].

Функции нейровоспаления:

- удаление фрагментов поврежденных клеток и различных компонентов внеклеточного матрикса;
- саногенетическая (опосредована отеком, отмывание частей клеток и внеклеточного матрикса);
- адаптация к повреждению;
- регенерация ткани;
- изоляция участка повреждения и формирование глиального рубца.

Аннотация. Нейровоспаление — универсальная адаптивная реакция нервной ткани на повреждение любого генеза (инфекционного, механического, токсического, гипоксического и др.). Его функция — адаптация к повреждению, нарушению гомеостаза и стимуляция регенеративных процессов. В условиях, когда воспалительная реакция приобретает большой размах (цитокиновый шторм) становится (в ответ на стимул) неконтролируемой, она может сама приводить к повреждению мозга. В условиях клиники становится актуальной задача контролировать этот процесс с помощью биомаркеров — участников нейровоспаления и использовать их полифункциональность и многоуровневое взаимодействие в целях усиления противовоспалительных механизмов.

Ключевые слова: нейровоспаление, микроглия, DAM-фенотип, цитокины, хемокины, астроглия, биомаркеры воспаления, протеазы, глутамат, молекулы адгезии.

Исдержки нейровоспаления:

- вторичное повреждение мозга (вследствие гиперпродукции медиаторов воспаления) [2];
- торможение ремиелинизации аксонов;
- гибель нейронов в зоне повреждения [3].

Механизмы инициации нейровоспаления:

Ключевая роль в инициации нейровоспаления принадлежит микроглии, другие резиденты и инфильтрируемые клеточные элементы вовлекаются в воспалительный процесс позже. Микроглия — класс клеток ЦНС, образующихся в онтогенезе из моноцитов крови. Клетки микроглии гомологичны макрофагам, что подтверждается антигенным составом их поверхности. Активирующими микроглию стимулами могут быть:

- фрагменты клеток и внеклеточного матрикса;
- медиаторы воспаления из активированного эндотелия;
- оксигемоглобин из поврежденных сосудов;
- пептиды (SP и CCGRP), высвобождаемые из сенсорных клеток. (SP — нейромедиатор и нейромодулятор, связан с воспалительным процессом и болью; CCGRP — пептид — вазодилататор, участвует в передаче болевых ощущений) [2].

Универсальность молекулярных механизмов воспалительного ответа определяется:

- отсутствием зависимости от исходного повреждающего фактора;
- активацией основных клеток нейровоспаления — микроглии в ответ на повреждающий мозг стимул;
- однотипными изменениями в экспрессии генов и активности белков;
- резко возрастающей продукцией провоспалительных цитокинов;
- экспрессией молекул адгезии;
- активацией протеаз;

- усилением продукции ферментов, генерирующих медиаторы воспаления (NO-синтазы, циклооксигеназы и др.);
- активацией TLR (толл подобных рецепторов).

В запуске нейровоспаления участвуют многие подтипы пуриновых и пиримидиновых рецепторов.

Глутамат, выделяемый нейронами при недостатке кислорода, взаимодействует с метаболитными рецепторами II типа и вызывает активацию в микроглии транскрипционного фактора NFκB, который ответственен за экспрессию «противовоспалительных генов».

Снижение оксигенации или уровня глюкозы может непосредственно активировать микроглию.

Таким образом, нейровоспаление оказывается универсальной реакцией ткани мозга не только на механическое повреждение или кровоизлияние, но также на интоксикацию, гипоксию и метаболический стресс. Определение в крови и ликворе биомолекул, участвующих в нейровоспалении, позволяет выявить их диагностическую и прогностическую ценность, а также приблизится к пониманию физиологии и патофизиологии нейровоспаления [2].

Повреждение нейронов влечет ряд последовательных закономерных изменений:

- нарушение состояния ионов как внутри клеток головного мозга, так и во внеклеточном матриксе;
- трансфузия ионов Na⁺ и Ca²⁺ из внеклеточного матрикса в нейроны;
- выход глутамата во внеклеточную среду;
- возбуждение глутаматных NMDA рецепторов;
- усиление притока Ca²⁺ в клетки мозга;
- деполяризация нейронов;
- активация мембранного насоса Ca²⁺ — АТФазы;
- истощение запаса глюкозы и переход обменных процессов на анаэробный путь гликолиза;
- накопление лактата;
- ацидоз;
- отек клеток;
- высвобождение арахидоновой кислоты из мембран нейронов;
- образование свободных радикалов, а также тромбоксанов, лейкотриенов и простагландинов;
- ишемия клеток головного мозга [4, 5, 6].

Микроглия

Это совокупность удлиненных звездчатых клеток с плотной цитоплазмой, имеющих мезодермальное происхождение. По строению она напоминает клетки эпандимы. В состоянии активации они увеличиваются в размерах и приобретают подвижность и свойства фа-

гоцитов. Их популяция взаимодействует со всеми клетками головного мозга и поддерживают гомеостаз [7, 8].

Функции микроглии:

- надзор за нейрогенезом путем фагоцитоза погибших клеток;
- воздействие на процессы апоптоза;
- участие в синаптическом прунинге (ликвидация нефункционирующих, лишних синапсов);
- модуляция силы синапсов, ответственных за взаимодействие нейронов;
- секреция нейротрофических факторов (BDNF-регулятор синаптического ремоделирования);
- влияние на формирование когнитивных функций [9, 10, 11].
- способность трансформироваться в активированный DAM-фенотип;
- синтез нейропротективных и нейротоксических факторов [12, 13].

Активации микроглии способствует:

- продукты распада нейронов в виде апоптических телец;
- липидные комплексы;
- появление в матриксе белковых агрегантов из распавшихся клеток;
- остатки миелина [11, 14].

Основные черты DAM-фенотипа микроглии:

- фагоцитарная активность;
- актуализация сигнального пути, контролируемого TREM2-рецептором [15];
- экспрессия генов, регулирующих фагоцитоз и ответственных за ликвидацию цитоскелета [11];
- запуск и поддержание процесса нейровоспаления;
- утрата контроля над регуляцией провоспалительных цитокинов и хемокинов [16];
- продукция про- и противовоспалительных цитокинов [11];
- экспрессия белка MD-1 (элемент иммунитета);
- повышенная пролиферация и экспрессия хемокинов (CXCL 10 и CCL 2) [17, 18].

Астроглия

Астроциты — совокупность клеток микроглии звездчатой формы с радиально отходящими тонкими отростками. Их густая сеть заполняет все пространство между телами и отростками нейронов.

Выделяют два типа астроцитов:

- протоплазматические с короткими разветвленными широкими отростками, с локализацией в сером веществе мозга;

- волокнистые (фибрилярные) с длинными тонкими слабо ветвящимися отростками, с преимущественным расположением в белом веществе мозга.

Основные функции астроглии в норме:

- опорная и разграничительная;
- трофическая (поддержание ионного баланса);
- обеспечение роста нервной ткани;
- репаративная;
- помощь в нейрональной миграции;
- защита нервной ткани;
- регуляция диаметра кровеносных сосудов и модуляция кровотока;
- энергетическая;
- осуществление синаптогенеза;
- формирование структуры ГЭБ.

При повреждении мозга астроциты активируют нейропротективную и нейрорегенеративную функции:

- синтез цитокинов и белков теплового шока;
- продукцию апополипротеина Е (для регенерации аксонов и синапсов);
- активацию гена АРОЕ (доставка холестерина к нейронам, поддержание целостности клеточных мембран и синапсов, восстановление клеток после повреждения) [9].
- экспрессию нейротрофического и цилиарного нейротрофического факторов;
- активацию глиоза и формирование глиальных рубцов.

Клетки астроглии способны синтезировать провоспалительные цитокины (ФНО-α), которые запускают каскад гибели нейронов [19, 20, 21].

Таким образом, микроглия и астроглия могут играть как протективную так и деструктивную роли при повреждении ЦНС.

В начальной стадии нейровоспаления эти иммунные резиденты ГМ:

- ограничивают поврежденную ткань от здоровой;
- повышают выживаемость нейронов;
- участвуют в процессах нейрогенеза и синаптогенеза;

В дальнейшем, по мере развития альтерации их активность может приобрести избыточный характер и приводить к:

- формированию глиальных рубцов;
- высокой экспрессии цитокинов и хемокинов;
- запуску процесса апоптоза [9].

Цитокины

Цитокины являются одними из основных регуляторов нейровоспаления. Это секретируемые различными

типами клеток белковые молекулы, состоящие из четырех α-спиральных цепей. Рецепторы цитокинов (сопряжены с тирозин-киназами) экспрессированы на всех типах клеток организма. Они активируют транскрипционные факторы STAT и каскад митоген-активированных протеинкиназ (MARK) и транскрипционного фактора NF-κB. STAT и NF-κB, транслоцируются в ядро, где регулируют активность генов.

Существуют также растворимые формы рецепторов цитокинов (отщепленный внеклеточный домен одной из субъединиц рецептора), которые участвуют в доставке цитокина к клетке-мишени.

Гены цитокинов являются индуцибельными, МРНК — нестабильной, а время полувыведения из крови для большинства цитокинов составляет несколько минут.

Цитокины опосредуют развитие системного воспаления и могут провоцировать развитие полиорганной недостаточности.

Нейровоспаление — изначально адаптивная реакция может становиться повреждающей для мозга в случае срыва ее внутренней регуляции [2].

Роль цитокинов и хемокинов в нейровоспалении

Цитокины — продуцируемые активированными клетками белково-пептидные факторы, обуславливающие межклеточные взаимодействия при кроветворении, воспалении и иммунном ответе. Они определяют:

- выживаемость клеток;
- стимуляцию или ингибирование их роста;
- дифференцировку;
- функциональную активизацию;
- апоптоз.

Они представляют собой наиболее универсальную регуляторную группу благодаря своей способности проявлять биологическую активность как дистанционно, так и при межклеточном контакте.

Осуществляя связь между иммунной, нервной, эндокринной и кроветворной системами, цитокины обеспечивают согласованность действия, формируют и регулируют комплекс патофизиологических сдвигов как нормальных условиях, так и в ответ на патологические воздействия [22].

Главными цитокинами с провоспалительным действием являются следующие.

ИЛ-1 секретируется преимущественно макрофагами/микроглией астроцитами и оказывает следующее влияние на ЦНС:

- выраженное провоспалительное;
- пирогенное;
- инициация начала воспалительных реакций;
- нейротоксическое;
- высвобождение NOS;
- увеличение выработки активных форм кислорода;
- активация синтеза возбуждающих аминокислот;
- взаимодействие с инфламасомами (миобелковый комплекс, активирующий воспалительный ответ) [23, 24, 25, 26].

ИЛ-6 синтезируется активированными макрофагами/микроглией, фибробластами, астроцитами, глиальными клетками сосудистого эндотелия, кератоцитами и Т-клетками, обладает провоспалительным действием. Его экспрессия запускает ряд механизмов воспаления:

- стимулирует мобилизацию энергии в мышцах и жировой ткани;
- пирогенное действие;
- индуцирует синтез печени белков острой фазы;
- стимулирует пролиферацию и дифференцировку В и Т-клеток;
- активирует лейкоцитопозез;
- увеличивает доставку субстрата к мышечным клеткам;
- включает в процесс нейровоспаления фактор транскрипции NF-κB, сигнальные пути Ca²⁺/NFAT и гликоген /p38MAPK;
- активизирует фактор транскрипции STAT 3;
- индуцирует поглощение цитрата гепатоцитами человека (активация синтеза липидов);
- организует миграцию Т-лимфоцитов и моноцитов в зону повреждения.

Интерлейкин-6 ответственен за:

- нейротоксический эффект;
- риск неблагоприятного исхода заболевания.

ИЛ-12 синтезируется микроглией и макрофагами. Его функции:

- провоспалительное действие;
- активация других провоспалительных цитокинов;
- содействие пролиферации цитотоксических лимфоцитов;
- запуск дифференцировки Т-клеток от Th0 к множеству Th1 (которые секретируют провоспалительные цитокины ИФН-γ, ИЛ-2, ИЛ-12, усиливает выработку ИФН-γ Th1-клетками);
- способствует развитию избыточного воспаления, («цитокинового шторма»).

Фактор некроза опухоли — альфа (ФНО, TNF-α) — многофункциональный провоспалительный цитокин, который синтезируется моноцитами и макрофагами. В процессе нейровоспаления он влияет на:

- метаболизм липидов;
- инсулинорезистентность;
- коагуляцию;
- функционирование эндотелия; продукцию ИЛ-1, ИЛ-6, ИЛ-8, интерферона-гамма;
- активацию лейкоцитов и NF-κB;
- гиперактивацию NMDA рецепторов;
- формирование хронического воспалительного процесса в ГМ;
- запуск процесса апоптоза нейронов;
- неблагоприятный нейропсихиатрический исход у пациентов [23].

ИЛ-10 — образуется в моноцитах и макрофагах и, в меньшей степени, лимфоцитах. Может оказывать как про-, так и противовоспалительный эффект. Среди его провоспалительных функций — повышение выработки ИФН-γ Т— или NK-клетками в очаге воспаления.

Противовоспалительные функции:

- снижает экспрессию цитокинов Th1;
- увеличивает выживаемость В-клеток, их пролиферацию и продукцию антител;
- блокирует активность NF-κB;
- регулирует сигнальный путь JAK-SNAT;
- ингибирует секрецию ФНО-альфа, ИЛ-1β, ИЛ-12, интерферона-гамма [9].

Хемокины

Хемокины представляют собой группу белков, стимулирующих передвижение лейкоцитов. Их синтезируют лейкоциты, тромбоциты, эпителиальные и эндотелиальные клетки. Они подразделяются на четыре класса в зависимости от положения ключевых остатков цистеина: C, CC, CXC и CX3C. Хемокины включают CCL2/MCP-1, CXCL12/SDF-1α, CX3CL1/фракталкин, CXCL10/IP10, CCL3/MIP-1α и CCL5/RANTES.

Хемокины оказывают своё действие как через специфические, так и через общие рецепторы, связанные с G-белком, экспрессируемые на клетках микроглии, астроцитах и нейронах.

Функции хемокинов:

- стимуляция миграции иммунных клеток;
- контроль за клетками иммунной системы;
- стимуляция ангиогенеза;
- регуляция процесса регенерации тканей.

CXCL8/CCL2/ИЛ-8 (моноцитарный хемоаттрактантный белок) секретируется нейтрофилами, нейробластами, эпителиальными клетками, гепатоцитами, альвеолярными макрофагами, эндотелиальными клетками. Он осуществляет следующие функции:

- поддержка хемотаксиса (привлечение нейтрофилов, эозинофилов, лимфоцитов и макрофагов в зону воспаления);
- активация нейтрофилов;
- активация протромботического фенотипа нейтрофилов (дегрануляция, образование нейтрофильных внеклеточных ловушек);
- усиление болевого синдрома;
- активация ангиогенеза.

Этот хемокин является участником иммунопатогенеза болезни Альцгеймера, биполярного расстройства, шизофрении, расстройств аутистического спектра, тревожных расстройств и расстройств сна [23].

CCL5/ (Regulated on Activation, Normal T cell Expressed and Secreted — RANTES), цитокинрегулируемый при активации, экспрессируемый и секретируемый нормальными Т-лимфоцитами. Это С-С β-хемокин, выполняющий функции селективного хемоаттрактанта, вызывающего миграцию лейкоцитов в зону воспаления (лимфоцитов, эозинофилов, Т-клеток, НК-клеток, базофилов), а также тучных клеток. При повреждении ЦНС CCL5 стимулирует Т-клетки, приводя к высвобождению ими провоспалительных цитокинов ИЛ-2 и ИФН-γ и апоптозу [9, 27, 28].

Диагностика нейровоспаления с помощью биомаркеров

Диагностика нейровоспаления возможна при помощи:

1. Методов нейровизуализации:
 - компьютерная томография ГМ;
 - магнитно-резонансная томография ГМ;
 - позитронно-эмиссионная томография (оценка гликолиза, обнаружение бета-амилоида, тау-белка).
2. Метода исследования биомаркеров (позволяет отслеживать динамику состояния пациента и прогнозировать исход). В сыворотке крови пациентов регистрируются следующие показатели:
 - белок S-100;
 - GFAP (белок цитоскелета клеток астроглии);
 - NSE (нейрон-специфическая енолаза);
 - белок С-tau;
 - альфа-II-спектрин;
 - уровень каспазы -3
 - эндотелин -1;
 - VEGF (фактор роста эндотелия);
 - MBP (основной белок миелина);
 - PNF-H (структурный белок аксонов);
 - MMP-матриксные металлопротеазы;
 - глутамат;
 - SICAM-1 (молекулы адгезии);
 - глюкокортикоиды;
 - уровень активности NOS (синтазы оксида азота) [2, 9, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35].

Маркеры нейронального происхождения

NSE — одна из структурных разновидностей фермента енолазы, который необходим для гликолиза. Она присутствует во всех клетках организма. Изоформы этого фермента тканеспецифичны. NSE кроме цитоплазмы нейронов встречается в клетках нейроэндокринного происхождения. NSE существует в виде димеров, в состав которых могут входить субъединицы α, β и γ. Для головного мозга специфичной изоформой являются α—γ, γ—γ. Определение уровня NSE в сыворотке крови пациентов позволяет оценить степень выраженности повреждений нейронов и нарушения проницаемости ГЭБ при повреждении мозга [36, 37, 38].

Белок С-tau (С — cleaved: расщеплённый) представляет собой фрагмент расщепленного с помощью ферментов белка MAP-tau (microtubule-associated protein tau). MAP-tau является структурным компонентом цитоскелета аксонов и принимает участие в формировании пучков микротрубочек. У пациентов с повреждением мозга и диффузным аксональным повреждением уровень белка С-tau в сыворотке крови и ЦСЖ возрастает в 40 000 раз, что свидетельствует о повреждении нейронов. Агреганты гиперфосфорилированного tau-белка являются признаками нейродегенеративных процессов [37].

Альфа II-спектрин — белок цитоскелета, расположенный в аксонах и пресинаптических терминалях. Продукты распада спектрина накапливаются в тканях, сыворотке крови, ликворе у пациентов с поражениями ЦНС [36, 37].

Ещё одним маркером повреждения нейронов может служить повышение уровней проапоптотических медиаторов каспазы-3 и каспазы-9 в сыворотке крови или в ликворе пациентов с повреждением мозга [9].

Маркеры глиального происхождения

Белок S-100, особенно изоформа S100β, в ЦНС содержится в астроцитах и шванновских клетках. В составе белков есть большое количество аспарагиновой и глутаминовой кислот из семейства Ca²⁺-связывающих белков.

S-100β участвующий в ряде регуляторных процессов в головном мозге:

- возникновение и передача нервных импульсов;
- фосфорилирование белков;
- рост клеток;
- процесс апоптоза.

При повреждении ЦНС из глиальных клеток S-100β попадает в сыворотку крови, что служит надёжным маркером повреждения нервной ткани. В ходе клинических

исследований с применением компьютерной томографии выявлена положительная связь между объёмом патологических изменений на снимке и уровнем S 100 β в сыворотке крови у пациентов [37].

GFAP — это мономерный белок, главная составляющая цитоскелета клеток астроглии. GFAP высвобождается во внеклеточное пространство при нарушении целостности глиальных клеток и высокоспецифичен для ЦНС. GFAP и убиквитин-С-концевая гидролаза часто исследуются совместно при определении повреждения головного мозга и позволяют с высокой точностью отличить пациентов с внутричерепными поражениями на КТ от пациентов без таковых [9, 37].

Маркеры мезенхимального происхождения

Эндотелин-1, биологически активный полипептид, является наиболее мощным вазоконстриктором и главным медиатором альтерации мозга. Синтезируется цереброваскулярным эндотелием. При повреждении ЦНС происходят изменения в функционировании эндотелия сосудов и уровень эндотелина-1 в сыворотке крови пациентов повышается [38].

Маркеры смешанного происхождения

VEGF является важным регулятором ангиогенеза, образование которого запускается гипоксией, цитокинами и активацией рецептора аденозина 2В. VEGF экспрессируется астроцитами, нейронами и эндотелием.

Диагностическое значение:

- показатель разрушения ГЭБ;
- индикатор астроглиоза;
- показатель развития ангиогенеза;
- стимулятор роста аксонов, увеличения плотности нейронов и астроцитов в ткани мозга [39].

Все вышеперечисленные биомаркеры относят к аларминам — молекулярным структурам, связанным с повреждением. Алармины являются клеточными компонентами, которые высвобождаются клетками во внеклеточную среду в ответ на стресс или повреждения [40].

Таким образом, представленный спектр биомаркеров дает возможность:

- оценить степень повреждения ткани мозга;
- определить интенсивность нейровоспаления [9];
- сформировать программу лечения;
- оценить эффективность проводимого лечения;
- дать прогноз исхода заболевания.

Основной белок миелина (MBP) участвует в адгезии цитоплазматических поверхностей миелиновых оболочек аксонов, регулирует проведение внеклеточных

сигналов к активному цитоскелету олигодендроцитов. Продукты его деградации в крови и ликворе и антитела к ним могут быть маркерами нейровоспаления [2].

Продукты протеолиза белков, специфических для нервной ткани

Нейроспецифические белки Тау и альфа-II-спектрин — субстраты протеаз каспаза-3 и калпаина.

Продукты протеолиза, С-tau и продукты деградации спектрина (SBDPS) могут определяться в ликворе и служить биомаркерами нейровоспаления.

Калпаин является Ca²⁺-зависимым протеолитическим ферментом, локализованным в телах нейронов и глии, в скелетных мышцах.

Участвует в синаптической пластичности и регуляции клеточного цикла.

Повышение концентрации продуктов протеолитической активности калпаина в ликворе связано с онкотическим некрозом, повышение активности каспазы-3 — с апоптозом.

Нейрофиламенты — структурные белки аксонов и являются биомаркерами повреждения нервной ткани. Фосфорилированная аксональная форма тяжелой цепи нейрофиламентов (pNF-H) определяется в сыворотке крови. Содержание этого белка особенно велико в тех областях мозга, где есть аксоны большого диаметра: в стволе и спинном мозге. Т.о. концентрация pNF-H в крови может отражать реальный характер повреждения мозга.

Фрагменты NMDA-рецептора

Фрагмент протеолитического расщепления NMDA рецептора (подтип NR2A/AB) высвобождается в кровь при ишемических поражениях ЦНС. Антитела к NR2A подтипу NMDA-рецептора в крови могут быть маркерами нейровоспаления.

Протеазы — большой класс ферментов, участвующих в реализации и регуляции всех биологических процессов. Их роль велика при нейровоспалении.

Матриксные металлопротеиназы (ММП) — семейство секретируемых нейтральных протеаз. Они регулируют структуру внеклеточного матрикса, доступность ростовых факторов и функционирование сигнальных систем на поверхности клеток. При воспалении ММП играют важную роль в ремоделировании и восстановлении ткани. Показано участие в нейровоспалении желатиназ А и В (ММП-2 и — 9), стромелизина-1 (ММП-3)

и ММР мембранного типа (MT1-ММР или ММР-14). Вклад этих ферментов в повреждение мозга при остром нейровоспалении значителен. Нейротоксические эффекты ММП связывают с их способностью повышать проницаемость ГЭБ.

В нейровоспалении участвуют эндогенные тканевые ингибиторы матриксных металлопротеаз (ТИМП) [2].

Ca^{2+} — зависимая кальпаиновая система внутриклеточных протеаз принимает активное участие в реакциях нейровоспаления.

Она осуществляет:

- перезапуск процесса деградации цитоскелетных и мембранных белков;
- аксональный транспорт белков типа β -амилоида, фосфорилированного Tau, способствуя их накоплению в тканях головного мозга;
- снижение энергетических запасов нейронов;
- вторичное повреждение и нарушение целостности клеток, что приводит их к гибели путем апоптоза [9].

Другие биомаркеры

Нейромедиатор глутамат играет роль в развитии эксайтотоксичности и последующей гибели нейронов посредством гиперактивации собственных рецепторов.

Его высокая концентрация в сыворотке и ликворе способствует развитию некроза и апоптоза клеток головного мозга и ассоциирована с неблагоприятным исходом заболевания.

Молекулы адгезии — участвуют в изменении проницаемости ГЭБ и инвазии клеток воспаления. Содержание SICAM-1 в ликворе пациентов с нейровоспалением коррелирует со степенью проницаемости ГЭБ, обширностью повреждения нервной ткани.

Эндокринные показатели

Глюкокортикоиды обеспечивают полноценное развитие воспалительного процесса в базовых концентрациях, а в больших — его завершение. Мощными активаторами гипоталамо-гипофизарно-глюкокортикоидной оси являются цитокины IL-1 β и IL-6 [2].

Еще одним механизмом повреждения нейронов является повышение активности синтаз оксида азота (NOS). Выделяют несколько видов NOS: нейрональный (nNOS), индуцируемый (iNOS) и эндотелиальный (eNOS). Из-за повышенной активности NOS происходит избыточное накопление NO. Окись азота в свою очередь вступает в реакцию с O_2 и образует пероксинитрит ONOO-,

который является высокотоксичным для нейрональных белков, липидов и нуклеиновых кислот.

Таким образом, повреждение тканей головного мозга вызывает:

- повреждение клеток;
- нарушение ионного баланса;
- трансмиссию ионов из межклеточного матрикса в клетки;
- неконтролируемый выброс нейротрансмиттеров;
- рост эксайтотоксичности;
- процесс апоптоза нейронов [33, 34, 35].

Маркером митохондриальной и эндотелиальной дисфункции рассматривается также повышение уровня асимметричного диметиларгинина [41].

Таким образом, представленный спектр биомаркеров позволяет косвенно отразить степень повреждения ткани головного мозга. Наиболее информативными являются S-100 β , NSE, GFAP, которые помогают оценить степень повреждения нервной ткани, дать прогноз и определить эффективность проводимого лечения [9].

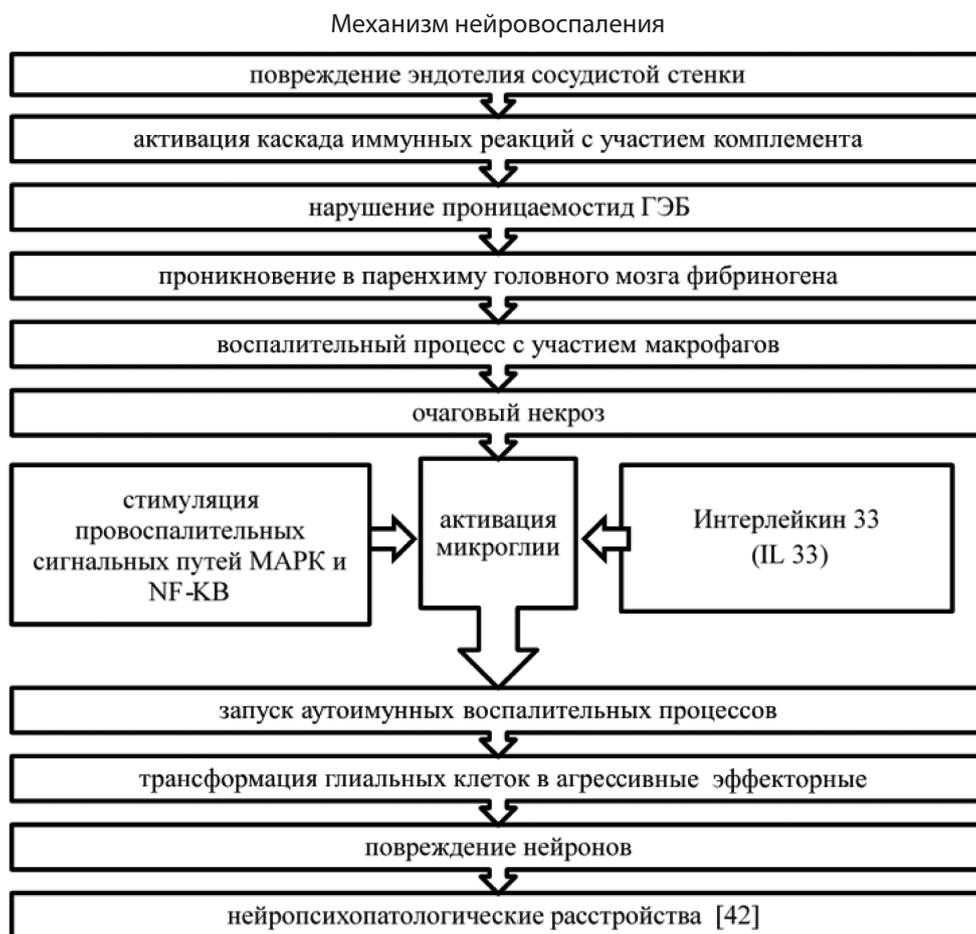
Нейровоспаление — адаптивно-репаративный механизм, но его нейротоксические эффекты могут быть результатом нарушения регуляции составляющих его процессов. Нормальный физиологический механизм защиты или восстановления нервной ткани, будучи неконтролируемым, приводит к абсолютной или относительной гиперпродукции медиаторов нейровоспаления, и в конечном счете к повреждению и гибели клеток мозга.

Современный уровень знаний пока не позволяет безопасно вмешиваться в механизмы нейровоспаления. По мнению ряда авторов целесообразно перенести акцент на изучение его адаптивных функций и внутренних регуляторных механизмов [2].

Активизация иммунных механизмов тканей головного мозга разрушительна для него и проявляется в краткосрочный период менингитом, энцефалитом, менингоэнцефалитом, а в период ПКС — аутоиммунными процессами, протекающими с периодами обострений и ремиссий.

Приобретенный иммунный ответ является адаптивным, медленным, системным, патоген-специфическим и индуцирует иммунологическую память.

Клеточно-опосредованный ответ «Th1» включает действие CD4+ Т-хелперных клеток, необходимых для уничтожения инфицированных клеток, для продуцирования интерферона II типа (ИФН- γ) и факторов некроза опухоли (ФНО- α).



Гуморальный ответ «Th2» включает действие CD4+ Т-хелперов и В-клеток, продуцирующих антитела [42].

В одном из исследований с помощью иммуногистохимических методов показана последовательность развития патологических процессов в тканях головного мозга при Covid-19 (схема 1).

Заключение

Каждый патологический процесс в нервной системе начинается с ее повреждения различными факторами физической или химической природы. Эти повреждения выражаются в:

- разрушении морфологических и функциональных связей;
- нарушении химических процессов;
- деструктивных и дезинтегративных явлениях, которые становятся условиями и причиной патологического процесса [43].

Нейровоспаление — комплексный процесс, отражающий взаимодействие иммунной и нервной системы, который запускается как вторичный каскад реакций в ответ на повреждение ЦНС. Вторичное повреждение выражается в:

- острой воспалительной реакции;
- нарушении ионного баланса;
- развитии отёка;
- трансмиссии клеточных элементов крови в ткань головного мозга;
- активации микро- и астроглии;
- гиперпродукции цитокинов и хемокинов;
- синтезе сигнальных молекул, регулирующих клеточные реакции;
- апоптозе нейронов.

Современные исследования демонстрируют важность изучения нейровоспаления при повреждении ГМ и его роли в процессах, как повреждения мозговых структур, так и в восстановлении пациента.

В динамическом плане остаются нерешенными вопросы оптимального набора биомаркеров для оценки тяжести воспаления. Не до конца выявлены все участники воспалительного процесса. В последние годы их число увеличивается, но остаются не вполне ясными их роли в реализации каскада реакций. Нет информации о том, как регулируется взаимодействие провоспалительных и противовоспалительных факторов, в силу каких причин и механизмов одни и те же участники нейро-

воспаления могут выполнять роли разнонаправленного характера. В силу каких причин воспалительные реакции приобретают избыточность, неконтролируемый фенотип, который приводит к смерти не только клетки, но и всего организма.

Насущным вопросом является процесс модуляции нейровоспаления. Апробированные на модели черепно-мозговой травмы лекарственные препараты (про-

гестерон, некростатин-1, циклоспорин, нилвадипин, этанерцепт, анакинра, миноциклин и др.) не показали надежных результатов.

Нужны новые научные исследования на мультидисциплинарной основе (инфекционные болезни, неврология, нейрохирургия, психиатрия, нейропсихология, иммунология, патофизиология и др.) [9, 44].

ЛИТЕРАТУРА

1. Harry G.J., Kraft A.D. Neuroinflammation and microglia: considerations and approaches for neurotoxicity assessment. //Expert opinion on drug metabolism & toxicology. — 2008. — Т.4. — №10. — С. 1265–1277. DOI: 10.1517/17425255.4.10.1265.
2. Пискунов А.К. Биомаркеры нейровоспаления //Нейрохимия. — 2010. — Т. 27. — №. 1. — С. 63–73.
3. Laird M.D., Vender J.R., & Dhandapani K.M. Opposing roles for reactive astrocytes following traumatic brain injury. Neuro-Signals. — 2008. —Т. 16. — №. 2–3. — С. 154–164. DOI: 10.1159/000111560
4. Farooqui A.A., Farooqui A.A. Neurochemical aspects of traumatic brain injury //Neurochemical Aspects of Neurotraumatic and Neurodegenerative Diseases. — 2010. — С. 183–218.
5. Kim J.Y. et al. Inflammation after ischemic stroke: the role of leukocytes and glial cells //Experimental neurobiology. — 2016. — Т. 25. — №. 5. — С. 241.
6. Loane D.J., Kumar A. Microglia in the TBI brain: the good, the bad, and the dysregulated //Experimental neurology. — 2016. — Т. 275. — С. 316–327.
7. Яковлев А.А. и др. Выработка долговременной устойчивости нейронов к экзайтотоксическому повреждению с помощью депривации трофических факторов //Биомедицинская химия. — 2016. — Т. 62. — №. 6. — С. 656–663.
8. Chitturi J. et al. Consolidated biochemical profile of subacute stage traumatic brain injury in early development //Frontiers in neuroscience. — 2019. — Т. 13. — С. 431. DOI: 10.3389/fnins.2019.00431
9. Карчевская А.Е., Паюшина О.В., Шарова Е.В., Окнина Л.Б., Титов О.Ю. Нейровоспаление как процесс вторичного повреждения при черепно-мозговой травме //Анналы клинической и экспериментальной неврологии. — 2023. — Т. 17. — №1. — С. 55–68. DOI: 10.54101/ACEN.2023.1.7
10. Loane D.J., Kumar A. Microglia in the TBI brain: the good, the bad, and the dysregulated //Experimental neurology. — 2016. — Т. 275. — С. 316–327. DOI: 10.1016/j.expneurol.2015.08.018
11. Гоголева В.С., Друцкая М.С., Атретхань К.С.Н. Микроглия в гомеостазе центральной нервной системы и нейровоспалении // Молекулярная биология. — 2019. — Т. 53, № 5. — С. 790–798. — DOI 10.1134/S0026898419050057.
12. Chiu I. M. et al. A neurodegeneration-specific gene-expression signature of acutely isolated microglia from an amyotrophic lateral sclerosis mouse model //Cell report. — 2013. — Т. 4. — №. 2. — С. 385–401.
13. Deczkowska A. et al. Disease-associated microglia: a universal immune sensor of neurodegeneration //Cell. — 2018. — Т. 173. — №. 5. — С. 1073–1081.
14. Huang Y. et al. Repopulated microglia are solely derived from the proliferation of residual microglia after acute depletion //Nature neuroscience. — 2018. — Т. 21. — №. 4. — С. 530–540.
15. Keren-Shaul H. et al. A unique microglia type associated with restricting development of Alzheimer's disease //Cell. — 2017. — Т. 169. — №. 7. — С. 1276–1290. e17.
16. Heppner F.L., Ransohoff R.M., Becher B. Immune attack: the role of inflammation in Alzheimer disease //Nature Reviews Neuroscience. — 2015. — Т. 16. — № 6. — С. 358–372.
17. Jordão M.J. C. et al. Single-cell profiling identifies myeloid cell subsets with distinct fates during neuroinflammation //Science. — 2019. — Т. 363. — №. 6425. — С. eaat7554.
18. Kierdorf K., Prinz M. Microglia in steady state. //The Journal of clinical investigation, 2017;127(9):3201–3209. DOI: 10.1172/JCI90602
19. Simon D.W. et al. The far-reaching scope of neuroinflammation after traumatic brain injury //Nature Reviews Neurology. — 2017. — Т. 13. — №. 3. — С. 171–191. DOI: 10.1038/nrneurol.2017.13
20. Smith C. et al. The neuroinflammatory response in humans after traumatic brain injury //Neuropathology and applied neurobiology. — 2013. — Т. 39. — №. 6. — С. 654–666. DOI: 10.1111/nan.12008/
21. Сорокина Е.Г., Семенова Ж.Б., Аверьянова Н.С., и др. Полиморфизм гена АРОЕ и маркеры повреждения мозга в исходах тяжелой черепно-мозговой травмы у детей. // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. — 2020. — Т 120. — №4. — С. 7280. DOI: 10.17116/jnevro202012004172
22. Zeiler F.A. et al. Cerebrospinal fluid and microdialysis cytokines in severe traumatic brain injury: a scoping systematic review //Frontiers in neurology. — 2017. — Т. 8. — С. 331. DOI: 10.3389/fneur.2017.00331.
23. Woodcock T., Morganti-Kossmann M.C. The role of markers of inflammation in traumatic brain injury //Frontiers in neurology. — 2013. — Т. 4. — С. 18. DOI: 10.3389/fneur.2013.00018.
24. Chiaretti A. et al. Nerve growth factor expression correlates with severity and outcome of traumatic brain injury in children //European Journal of Paediatric Neurology. — 2008. — Т. 12. — №. 3. — С. 195–204. DOI: 10.1016/j.ejpn.2007.07.016.
25. Kuwar R., Rolfe A., Di L., Xu H., He L., Jiang Y., Zhang S., Sun, D. A novel small molecular NLRP3 inflammasome inhibitor alleviates neuroinflammatory response following traumatic brain injury. // Journal of neuroinflammation, — 2019. — Т. 16. — С. 81. DOI: 10.1186/s12974-019-1471-y/

26. Yue Y. et al. Interleukin-1 in cerebrospinal fluid for evaluating the neurological outcome in traumatic brain injury //Bioscience Reports. — 2019. — Т. 39. — №. 4. — С. BSR20181966. DOI: 10.1042/BSR20181966/
27. Akamatsu Y., Hanafy K.A. Cell death and recovery in traumatic brain injury //Neurotherapeutics. — 2020. — Т. 17. — №. 2. — С. 446–456. DOI: 10.1007/S13311-020-00840-7/
28. Albert V. et al. RANTES levels in peripheral blood, CSF, and contused brain tissue as a marker for outcome in traumatic brain injury (TBI) patients //BMC research notes. — 2017. — Т. 10. — С. 139. DOI: 10.1186/s13104-017-2459-2/
29. Shahim P., Zetterberg H. Neurochemical markers of traumatic brain injury: relevance to acute diagnostics, disease monitoring, and neuropsychiatric outcome prediction //Biological psychiatry. — 2022. — Т. 91. — №. 5. — С. 405–412. DOI: 10.1016/j.biopsych.2021.10.010.
30. Сорокина Е.Г., Семенова Ж.Б., Лукьянов В.И., Карасева О.В., Афанасьева С.А., Реутов В.П., Пинелис В. Г. Биохимические предикторы ранних и отдаленных исходов черепно-мозговой травмы у детей. // Новые технологии в медицине, биологии, фармакологии и экологии: Материалы Международной конференции NT + M&Eс 2020. Весенняя сессия, Гурзуф, 31 мая — 10 2021 года. — Москва: ООО Институт новых информационных технологий, 2021. — С. 154–160. — DOI 10.47501/978-5-6044060-1-4.24.
31. Kwon B.K. et al. Neurochemical biomarkers in spinal cord injury //Spinal Cord. — 2019. — Т. 57. — №. 10. — С. 819–831.
32. Сорокина Е.Г. и др. Маркеры повреждения мозга в дебюте легкой черепно-мозговой травмы у детей //Новые информационные технологии в медицине, биологии, фармакологии и экологии. — 2017. — С. 204–212.
33. Реутов В.П. и др. Оксид азота и аутоиммунные процессы при черепно-мозговой травме //Евразийское научное объединение. — 2016. — Т. 1. — №. 5. — С. 39–46.
34. Епифанцева Н.Н. Борщикова Т.И., Чурляев Ю.А. и др. Прогностическое значение белка S100, нейронспецифической енолазы, эндотелина1 в остром периоде тяжелой черепно-мозговой травмы //Медицина неотложных состояний. — 2013. — №. 3 (50). — С. 85–90.
35. Jarrahi A. et al. Revisiting traumatic brain injury: from molecular mechanisms to therapeutic interventions //Biomedicines. — 2020. — Т. 8. — №. 10. — С. 389. DOI: 10.3390/biomedicines8100389/
36. Маркелова Е.В., Зенина А.А., Кадыров Р.В. Нейропептиды как маркеры повреждения головного мозга //Современные проблемы науки и образования. — 2018. — №. 5. — С. 206.
37. Сосновский Е.А., Пурас Ю.В., Талыпов А.Э. Биохимические маркеры черепно-мозговой травмы //Нейрохирургия. — 2014. — №. 2. — С. 83–91. DOI: 10.17650/1683–3295-2014-0-2-83-91.
38. Edalatfar M., Piri S.M., Mehrabinejad M.M. et al. Biofluid Biomarkers in Traumatic Brain Injury: A Systematic Scoping Review. Neurocrit Care 35, 559–572 (2021). DOI: 10.1007/s12028-020-01173-1
39. Shore P.M., Jackson E.K., Wisniewski S.R., Clark R.S., Adelson P.D., Kochanek P.M. Vascular endothelial growth factor is increased in cerebrospinal fluid after traumatic brain injury in infants and children. Neurosurgery. — 2004. — Т. 54. — №. 2. — С. 605–612. DOI: 10.1227/01.neu.0000108642.88724.db
40. Anfinogenova N.D., Quinn, M. T., Schepetkin, I.A., Atochin D.N. Alarmins and c-Jun N-Terminal Kinase (JNK) Signaling in Neuroinflammation. //Cells. — 2020. — Т. 9. — №. 11. — С. 2350. DOI: 10.3390/cells9112350
41. Ойноткинова О.Ш. и др. Влияние SARS-CoV-2 на мультиорганное поражение и реабилитационная тактика в постковидном периоде //Kardiologia i Serdechno-Sosudistaya Khirurgia. — 2022. — Т. 15. — №. 2. — С. 202–214. DOI: 10.17116/kardio202215021202.
42. Сапроненкова О.А., Широков Е.А. Постковидные нейрокогнитивные расстройства //Клиническая медицина. — 2023. — Т. 101. — №. 6. — С. 265–274: DOI: 10.30629/0023-2149-2023-101-6-265-274
43. Крыжановский Г.Н. Общая патофизиология нервной системы и высшей нервной деятельности. Патофизиология. Курс лекций; учебное пособие/ П.Ф. Литвицкий, Н.И. Лосев, В.А. Войнов и др., под ред. П.Ф. Литвицкого. — М., 1995. — 752 с.
44. Никифоров И.А., Костюк Г.П., Игумнов С.А., Бурыгина Л.А., Белова М.Ю., Истомина В.В., Аронов П.В. «Психические расстройства, вызванные эпидемией Covid-19» Учебное пособие. — М.: Постер-М, 2024. — 49 с.

© Никифоров Игорь Анатольевич (narkolog.ipk@mail.ru); Чернобровкина Тамара Васильевна (narkolog.ipk@mail.ru);

Костюк Георгий Петрович (pkb1@zdrav.mos.ru); Бурыгина Лариса Андреевна (pkb4@zdrav.mos.ru);

Белова Майя Юрьевна (pkb4-pb3@zdrav.mos.ru); Истомина Виктория Витальевна (pkb4-pb3@zdrav.mos.ru);

Кардашян Руслан Антраникович (rakar_26@mail.ru); Игумнов Сергей Александрович (igumnov_sa@rsmu.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ФАКТОРЫ РИСКА И ПРЕДИКТОРЫ ПРЕЖДЕВРЕМЕННЫХ РОДОВ У ЖЕНЩИН С МНОГОПЛОДНОЙ БЕРЕМЕННОСТЬЮ

RISK FACTORS AND PREDICTORS OF PREMATURE BIRTH IN WOMEN WITH MULTIPLE PREGNANCIES

T. Ozdoeva

Summary. Premature birth (PR) remains the leading cause of perinatal morbidity and mortality in multiple pregnancies, the frequency of which is steadily increasing due to the development of assisted reproductive technologies. The purpose of this article is a systematic analysis of current data on risk factors and predictors of PR in women carrying multiple pregnancies. Based on the analysis of literature sources, key unmodifiable (type of zygosity, parity, maternal age, obstetric history) and modifiable (smoking, infections, short intergenetic interval, BMI) risk factors are identified. Special attention is paid to the prognostic significance of the length of the cervix during transvaginal ultrasound, the determination of fetal fibronectin, as well as the role of anamnestic data and the course of a real pregnancy. Understanding and timely identification of these factors and predictors is crucial for risk stratification, optimization of prenatal follow-up, timely prevention (prescribing progesterone, cerclage), and selection of optimal management tactics aimed at prolonging pregnancy and improving perinatal outcomes.

Keywords: multiple pregnancies, premature birth, risk factors, predictors, cervicometry, fetal fibronectin, progesterone, perinatal outcomes.

Оздоева Танзила Исламовна

Аспирант, Кабардино-балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

Ozdo96@mail.ru

Аннотация. Преждевременные роды (ПР) остаются ведущей причиной перинатальной заболеваемости и смертности при многоплодной беременности, частота которой неуклонно растет в связи с развитием вспомогательных репродуктивных технологий. Целью данной статьи является систематический анализ современных данных о факторах риска и предикторах ПР у женщин, вынашивающих многоплодную беременность. На основании анализа литературных источников выделены ключевые немодифицируемые (тип зиготности, паритет, возраст матери, акушерский анамнез) и модифицируемые (курение, инфекции, короткий интергенетический интервал, ИМТ) факторы риска. Особое внимание уделено прогностической значимости длины шейки матки при трансвагинальном УЗИ, определению фибронектина плода, а также роли анамнестических данных и течения настоящей беременности. Понимание и своевременное выявление этих факторов и предикторов имеет решающее значение для стратификации риска, оптимизации пренатального наблюдения, своевременной профилактики (назначение прогестерона, серкляж) и выбора оптимальной тактики ведения, направленных на пролонгирование беременности и улучшение перинатальных исходов.

Ключевые слова: многоплодная беременность, преждевременные роды, факторы риска, предикторы, цервикометрия, фетальный фибронектин, прогестерон, перинатальные исходы.

Введение

Многоплодная беременность представляет собой значимую проблему современного акушерства в связи с существенно повышенным риском осложнений как для матери, так и для плодов. Наиболее грозным и частым осложнением являются преждевременные роды (ПР), определяемые как роды, произошедшие до завершения 37 полных недель гестации. Частота ПР при двойнях достигает 50–60 %, а при тройнях и высших порядках многоплодия приближается к 100 %, что в разы превышает показатели при одноплодной беременности [1, с. 15; 2, с. 24].

ПР являются основной причиной перинатальной заболеваемости (респираторный дистресс-синдром, внутри желудочковые кровоизлияния, некротизирующий энтероколит, сепсис, ретинопатия недоношенных) и смертности среди новорожденных от многоплодных беременностей [3, с. 70].

Кроме того, ПР ассоциированы с отдаленными неврологическими последствиями, включая детский церебральный паралич и когнитивные нарушения, а также с повышенной материнской заболеваемостью. В связи с этим, своевременная идентификация женщин с многоплодной беременностью, имеющих высокий риск развития ПР, является приоритетной задачей пренатального наблюдения. Цель данной статьи — обобщить современные знания о факторах риска и клинически значимых предикторах ПР у женщин с многоплодной беременностью для совершенствования стратегий профилактики и ведения.

Основные результаты

При анализе этиологии преждевременных родов (ПР) при многоплодной беременности принципиальное значение имеет разграничение понятий факторов риска и предикторов. Факторы риска представляют собой совокупность демографических, анамнестических, клини-

ческих и социальных характеристик, наличие которых статистически значительно повышает вероятность наступления ПР. Ключевым аспектом является их классификация на немодифицируемые (например, возраст матери, расовая принадлежность, тип зачатия), не поддающиеся изменению в ходе текущей беременности, и модифицируемые (например, курение, индекс массы тела), потенциально корригируемые при своевременном вмешательстве. В отличие от них, предикторы — это объективно измеряемые параметры, регистрируемые в процессе настоящей гестации (преимущественно инструментальные или лабораторные), которые обладают прогностической ценностью в отношении вероятности развития ПР в определенные временные интервалы [4, с. 9]. Классическими примерами таких предикторов служат длина шейки матки, определяемая при ультразвуковой цервикометрии, и уровень фетального фибронектина.

Немодифицируемые факторы занимают центральное место в оценке исходного риска. Многочисленные исследования подтверждают, что монозиготные (однояйцевые) двойни сопряжены с существенно более высоким риском ПР по сравнению с dizиготными, что, по-видимому, обусловлено повышенной частотой специфических осложнений, таких как синдром фето-фетальной трансфузии и селективная задержка роста плода [4, с. 7]. Не вызывает сомнений прогрессивное нарастание риска ПР и степени недоношенности с увеличением порядка многоплодия — от двоен к тройням и далее [1, с. 8]. Особого внимания заслуживает анамнез пациентки: наличие спонтанных ПР, особенно ранних или очень ранних, признается одним из наиболее значимых факторов риска их повторения при многоплодной беременности [5, с. 135]. Кроме того, установлена связь повышенного риска ПР с крайними репродуктивными возрастами матери (<18 и ≥35 лет) [6, с. 367], а также, согласно ряду исследований, с негроидной расой по сравнению с европеоидной [7, с. 49]. Дискуссионным остается вопрос о вкладе вспомогательных репродуктивных технологий (ЭКО/ИКСИ): некоторые данные указывают на несколько повышенный риск ПР по сравнению со спонтанным многоплодием, даже после коррекции на возраст и паритет, однако важно подчеркнуть, что сам факт многоплодия остается доминирующим [8, с. 816]. Наконец, наличие структурных или хромосомных аномалий у одного или нескольких плодов также ассоциировано с увеличением риска досрочного родоразрешения.

Среди модифицируемых факторов риска первостепенное значение имеют алиментарные факторы. Доказано, что низкий прегравидарный индекс массы тела и недостаточная прибавка веса во время беременности критически важны для пролонгирования гестации при многоплодии, требуя активной нутритивной поддержки [9].

Неоспоримым фактором риска, негативно влияющим на все аспекты течения беременности, является курение, значительно повышающее вероятность ПР и задержки роста плодов [10, с. 11]. Существенную роль играют урогенитальные инфекции (бактериальный вагиноз, инфекции, передаваемые половым путем), являющиеся значимым корригируемым триггером спонтанных ПР [11, с. 29].

Кроме того, потенциально негативное влияние могут оказывать короткий интергенетический интервал (<6 месяцев), тяжелый физический труд и хронический психоэмоциональный стресс. Отдельно следует упомянуть патологию шейки матки в анамнезе (конизация, травматичные роды), предрасполагающую к развитию истмико-цервикальной недостаточности.

Преждевременные роды при многоплодной беременности представляют серьезную клинико-социальную проблему, поскольку связаны с высокой перинатальной заболеваемостью и смертностью новорожденных. Многоплодие, ставшее более распространенным из-за широкого применения вспомогательных репродуктивных технологий, сопровождается повышенной нагрузкой на женский организм и риском возникновения различных осложнений, среди которых ключевое место занимают преждевременные роды. В связи с этим исследования, направленные на выявление статистически значимых факторов, определяющих вероятность недоношенного родоразрешения, и на оценку прогностической значимости инструментальных и лабораторных методов, приобретают особую актуальность. Эффективная профилактика и снижение частоты преждевременных родов невозможны без интегрированного анализа множества показателей, таких как анамнестические данные (включая паритет, возраст, особенности предыдущих беременностей), социально-бытовые условия, наличие урогенитальных инфекций, индекс массы тела, курение, уровень фетального фибронектина, длина шейки матки и ряд других параметров. Комплексный характер исследования предполагает не только выявление факторов риска и предикторов, но и математическую проверку (статистический анализ) полученных данных для формирования доказательной базы и повышения точности прогноза.

В рамках данной работы проводился анализ показателей, отражающих особенности течения беременности и состояние женского здоровья при многоплодной гестации. Для каждого оцениваемого параметра важно определить конкретные граничные значения, их корректность для разных гестационных сроков, а также выявить взаимосвязь между этими величинами и вероятностью наступления преждевременных родов. Особое внимание уделяется динамике длины шейки матки при ультразвуковом исследовании, так как при многоплодии высо-

кий риск предполагает более интенсивное структурное перестраивание цервикального канала. Существенным аспектом является контроль за питанием, полноценностью рациона и прибавкой массы тела, поскольку недостаточная нутритивная поддержка может усиливать тенденцию к преждевременному прерыванию гестации. Нетривиальными оказываются результаты, отражающие биомаркеры воспаления, а также эндокринные изменения, способные сигнализировать о нарушении механизмов пролонгирования беременности. Для иллюстрации ряда выявленных закономерностей ниже представлена обобщающая сводная таблица, основанная на статистической оценке факторов риска и потенциальных предикторов, полученных из клинических наблюдений (табл. 1).

Таблица 1.
Распределение основных параметров, ассоциированных с риском преждевременных родов при многоплодии (n=78)

Показатель	Среднее значение $\pm \sigma$	Минимум	Максимум	p-value
Возраст матери (лет)	31.47 \pm 4.12	18.86	42.09	0.0431
Индекс массы тела (кг/м ²)	24.93 \pm 2.07	19.44	29.11	0.0284
Количество предыдущих ПР	0.71 \pm 0.36	0.00	2.00	0.0512
Длина шейки матки (мм)	29.58 \pm 4.83	19.42	40.09	0.0017
Уровень фетального фибронектина (нг/мл)	48.37 \pm 15.42	13.52	83.69	0.0009
Количество выкуриваемых сигарет в день	2.85 \pm 1.04	0.00	5.10	0.0598
Наличие урогенитальных инфекций (балл)	1.47 \pm 0.62	0.00	2.00	0.0477
Прибавка массы тела к 28 нед (кг)	8.12 \pm 2.29	3.07	14.11	0.0399

Представленная совокупность данных отражает вклад различных клинических и социально-бытовых факторов в вероятность развития преждевременных родов у женщин с многоплодной беременностью. В частности, выявлено, что средний возраст женщин в исследуемой выборке составляет 31.47 года, тогда как минимальное и максимальное значения существенно выходят за рамки традиционно безопасного возрастного диапазона. Математическая оценка (p-value = 0.0431) указывает на статистическую значимость влияния возраста женщины на риск досрочного родоразрешения: женщины старше 35 лет или младше 18 лет демонстрируют повышенную предрасположенность к преждев-

ременным родам. Индекс массы тела, по имеющимся данным, колебался от 19.44 до 29.11, при этом средняя величина 24.93 \pm 2.07 находилась на верхней границе референсных значений. Отмечается, что фактор ИМТ тесно взаимосвязан с нутритивной поддержкой, и статистический анализ (p-value = 0.0284) подтверждает значительный вклад данного

Крайне важным прогностическим фактором стала оценка длины шейки матки, так как среднее значение в исследуемой когорте составило 29.58 мм при типичной границе 25 мм, где риск ПР возрастает в геометрической прогрессии. Высокая степень значимости данного показателя (p-value = 0.0017) демонстрирует, что при сокращении длины шейки ниже нормативных пороговых значений вероятность преждевременной родовой деятельности резко возрастает. Аналогичным образом, положительный тест на фетальный фибронектин (средний уровень 48.37 нг/мл) при пороговом уровне 50 нг/мл также сопровождается ростом риска ПР, что нашло отражение в низком p-value = 0.0009. Интересно, что количество сигарет в день, несмотря на сравнительно небольшое среднее значение (2.85), также показало связь с риском, хоть и менее выраженную (p-value = 0.0598), что может быть связано с размером подвыборок курящих и некурящих пациенток. В сумме все параметры таблицы подкрепляют гипотезу о том, что многоплодная беременность, особенно при наличии сочетания нескольких предрасполагающих факторов (возраст, укорочение шейки, наличие урогенитальных инфекций и др.), формирует выраженный комплекс патогенетических механизмов, приводящих к преждевременному родоразрешению.

Далее, чтобы более детально рассмотреть динамику некоторых ключевых показателей, важно проанализировать, каким образом длина шейки матки и уровень фетального фибронектина взаимодействуют между собой при многоплодной беременности на разных сроках гестации. Для этого были выделены подгруппы в зависимости от выявленных порогов снижения длины шейки и увеличения уровня фибронектина, а также сопоставлены результаты с фактически наступившими родами. Особый фокус направляется на тех женщин, у которых отмечено стремительное укорочение шейки матки (более 10 мм за период в 2–3 недели) и/или резкий рост концентрации фетального фибронектина выше 50 нг/мл.

Представленные данные позволяют проследить закономерное уменьшение длины шейки от первой контрольной точки (16–18 недель) ко второй (20–22 недели): уменьшение в среднем составило 3.52 мм. На этом этапе фетальный фибронектин имел среднее значение 30.55 нг/мл, а число наступивших к этому времени преждевременных родов до 34 недель составило 1 случай. Далее к 24–26 неделям средний показатель длины

Таблица 2.

Динамика длины шейки матки и уровня фетального фибронектина при многоплодной беременности (n=42)

Период наблюдения (недели)	Средняя длина шейки (мм) ± σ	Изменение за 2–3 недели (мм)	Уровень фФН, нг/мл (среднее ± σ)	Число ПР до 34 недель (чел.)
16–18	36.81 ± 4.29	–	18.44 ± 6.57	0
20–22	33.29 ± 4.02	–3.52	30.55 ± 10.07	1
24–26	29.14 ± 3.69	–4.15	40.92 ± 11.36	3
28–30	25.72 ± 4.01	–3.42	52.60 ± 14.02	5

шейки уменьшился еще на 4.15 мм (среднее достигает 29.14 ± 3.69 мм), а уровень фетального фибронектина поднимается до 40.92 нг/мл. Число зафиксированных преждевременных родов возрастает до 3. Математическая проверка внутри подгрупп свидетельствует о хорошем согласовании данной динамики с ожидаемыми рисками, так как повышение уровня фФН сопровождается нарастанием случаев преждевременного родоразрешения в ближние сроки.

К 28–30 неделям длина шейки снижается еще на 3.42 мм, достигнув среднего уровня 25.72 ± 4.01 мм. При этом концентрация фетального фибронектина превышает граничные 50 нг/мл (52.60), что тесно коррелирует с дальнейшим повышением числа женщин, у которых произошло досрочное родоразрешение. К тому моменту зафиксировано уже 5 случаев ПР до 34 недель. Увеличение концентрации фФН более чем на 20 нг/мл в ходе наблюдения (с 30.55 до 52.60) является критичным маркером локального воспалительного или децидуального процесса, способствующего нарушению целостности плодных оболочек или усилению сократительной активности матки. Таким образом, динамические ультразвуковые характеристики шейки матки, сопоставленные с показателями фФН, подтверждают, что ускоренное укорочение цервикального канала и рост концентрации фибронектина сопряжены с высокой вероятностью наступления родов до срока, что имеет ключевое профилактическое и терапевтическое значение в практике ведения многоплодной беременности.

Важнейшим элементом исследования также стала оценка влияния урогенитальных инфекций и алиментарных факторов (прежде всего корректности питания и прибавки веса) на формирование сочетанного риска преждевременных родов. Своевременная диагностика и лечение бактериальных, вирусных и протозойных инфекций могут существенно снизить вероятность ПР, особенно если проблема выявлена на ранних сроках. При этом недостаточный индекс массы тела матери или низкая динамика его роста при многоплодии часто приводят к нехватке ресурсов для нормального доноши-

вания беременности. Аналогичным образом пагубное влияние курения и стресса, связанные с хронической активацией медиаторов воспаления, негативно сказываются на состоянии плацентарного комплекса и снижении комплаенса шейки матки, что дополнительно повышает риск ПР.

Таблица 3.

Связь уровня прибавки веса и урогенитальных инфекций с вероятностью ПР (n=64)

Категория	Средняя прибавка массы, кг (до 28 нед) ± σ	Инфекционный индекс (0–3) ± σ	Доля ПР до 36 нед, % (факт)	p-value
Низкая прибавка (<7 кг)	5.64 ± 0.89	1.68 ± 0.53	47.37	0.0325
Средняя прибавка (7–10 кг)	8.21 ± 0.77	1.35 ± 0.66	28.54	0.0459
Высокая прибавка (>10 кг)	11.02 ± 1.32	1.09 ± 0.48	23.08	0.0417

Данными таблицы демонстрируется, как варьирует риск преждевременных родов при различных уровнях прибавки массы тела у беременных с многоплодием и как одновременно проявляется степень выраженности урогенитальных инфекций. В первой группе, где прибавка массы тела к 28 неделям была менее 7 кг, доля фактически произошедших ПР до 36 недель составила 47.37 %. Это наиболее высокое значение по сравнению с другими подгруппами и коррелирует с повышенной выраженностью инфекционного индекса, равного в среднем 1.68. p-value = 0.0325 свидетельствует о статистически значимом влиянии недостаточной прибавки массы и сопутствующих инфекционных осложнений на вероятность недоношенного родоразрешения.

При избыточной прибавке массы тела в среднем свыше 10 кг риск досрочного родоразрешения, по наблюдаемым данным, снижается до 23.08 %. Показатель инфекционного индекса в этой группе также ниже (1.09), что может указывать на более тщательное наблюдение и профилактику. Средние значения (7–10 кг) демонстрируют промежуточный риск, равный 28.54 %. Между степенью выраженности урогенитальных инфекций и склонностью к преждевременным родам также прослеживается прямая зависимость, которая усиливается при низком весовом приросте. Вероятно, на фоне недостаточной массы тела и несбалансированного питания иммунная защита организма снижается, поэтому патологические агенты активнее воздействуют на ткани шейки матки, повышая вероятность преждевременного их раскрытия или инициирования воспалительного каскада, приводящего к сокращениям матки. Таким образом, таблица демонстрирует, что оптимальная прибавка массы, наряду с контролем инфекций, существенно уменьшает риск развития ПР при многоплодной беременности.

В ходе проведенного исследования использовались методы корреляционного и регрессионного анализа, которые позволили выявить наличие синергетического эффекта между несколькими факторами риска. Например, сочетание укороченной шейки более чем на 5 мм за две недели и повышенного инфекционного индекса (выше единицы) приводит к кратному росту вероятности ПР. Аналогичным образом доказано, что при доношении беременности в условиях отсутствия активных инфекционных процессов и наличии адекватной нутритивной поддержки снижается не только риск спонтанного сокращения матки, но и вероятность ятрогенных вмешательств, связанных с декомпенсацией плацентарного кровотока. Важно отметить, что статистическая достоверность этих выводов подтверждается тестами значимости ($p < 0.05$), и тенденции воспроизводимы на независимых подвыборках пациенток.

Для оценки суммарного вклада отдельных факторов и построения многофакторной модели использовалось разделение всей выборки на тех, у кого гестация завершилась ПР, и тех, кто доносил беременность до ≥ 36 недель. В этом анализе учитывались возраст, ИМТ, наличие вредных привычек, наличие эпизодов укорочения шейки до 25 мм, диагностированные инфекции, колебания уровня фФН. Далее создавалась бинарная логистическая модель, определяющая вероятность ПР как функцию этих переменных. Расчеты продемонстрировали высокую специфичность и чувствительность при пороговом уровне вероятности 0.50, что указывает на перспективность применения подобного алгоритма в рутинной практике.

Многофакторная модель дает ключ к пониманию взаимодействия различных факторов на риск ПР при многоплодной беременности, отражая относительный вклад каждого из них. Наиболее выраженные коэффициенты регрессии (β) наблюдаются для фетального фибронектина выше 50 нг/мл (1.276) и укорочения шейки менее 25 мм (1.021). Их статистическая значимость подтверждается соответствующими p -value 0.0004 и 0.0008. Относительные риски ($\exp(\beta)$) по этим показателям достигают 3.58 и 2.78 соответственно, что указывает на почти трех- и более чем двукратное увеличение вероятности ПР при наличии данных факторов. Примечательно, что возраст и выраженность инфекций имеют практически одинаковые регрессионные коэффициенты (0.671 и 0.674) и сходные значения относительного риска около 1.96, подтверждая первостепенное значение как возрастного фактора (крайние возрастные группы), так и наличия активного инфекционного процесса.

Курение выступает дополнительным, но менее сильным фактором, повышающим вероятность преждевременных родов примерно в 1.53 раза. Это не столь масштабный показатель по сравнению с уровнем фФН,

Таблица 4.

Многофакторная модель риска ПР при многоплодной беременности ($n=56$)

Переменная	Коэффициент регрессии (β)	Ст. ошибка	Оценка достоверности (p -value)	Относительный риск ($\exp(\beta)$)
Возраст >35 или <18 лет	0.671	0.242	0.0043	1.96
Индекс массы тела <20 кг/м ²	0.589	0.287	0.0371	1.80
Укорочение шейки <25 мм	1.021	0.304	0.0008	2.78
фФН >50 нг/мл	1.276	0.351	0.0004	3.58
Курение (любое)	0.423	0.213	0.0489	1.53
Инфекции (оценка >1 по шкале)	0.674	0.264	0.0092	1.96
Постоянный член (константа)	-2.019	0.410	0.0001	–

однако при кумулятивном эффекте с другими факторами (низкий ИМТ, инфекции и т.д.) вклад курения способен становиться более выраженным. Константа в модели имеет отрицательное значение (-2.019), что свидетельствует о базовом низком риске ПР при отсутствии перечисленных факторов. Все p -value соответствуют общепринятому уровню статистической значимости <0.05 . Таким образом, данная регрессионная модель подтверждает, что именно совокупность нескольких факторов, таких как короткая шейка и повышенный фФН, приводит к резкому возрастанию вероятности преждевременных родов. При этом расчет прогнозируемых значений вероятности ПР для каждой пациентки, исходя из зарегистрированных у нее значений по перечисленным признакам, может стать основой для персонализированного мониторинга и профилактики.

Завершающая часть исследования фокусировалась на сравнении фактически достигнутых перинатальных исходов у пациенток с различным сочетанием факторов риска и потенциальных предикторов. Было подтверждено, что при заблаговременном выявлении укорочения шейки матки (особенно при длине <25 мм) и назначении вагинального прогестерона у дихориальных двоен удалось снизить частоту ПР до 34 недель более чем на 15 %. Кроме того, в группах, получавших своевременное лечение урогенитальных инфекций, частота ПР <34 недель оказалась ниже (примерно 25 %), чем в группах без адекватной антимикробной терапии (около 40 %).

Хотя перечисленные результаты демонстрируют положительный эффект персонализированного подхода,

остаётся актуальным вопрос о корректности выбора тактики ведения для три- и более плодно составных беременностей. Аналитически установлено, что чем выше порядок многоплодия, тем более агрессивно проявляются факторы риска, особенно инфекционный и цервикальный компоненты, и тем менее предсказуемой может оказываться реакция на профильные вмешательства (прогестерон, серкляж и др.). Важно, что при наличии крайне высоких рисков требуется не только индивидуализированное медикаментозное и немедикаментозное сопровождение, но и расширенный набор диагностических мероприятий, включая повторную цервикометрию каждые 1–2 недели после 20-й недели и оценку фФН при первых признаках угрозы.

При этом необходимо учитывать, что показатели уровня фФН и укорочения шейки — далеко не единственные. Активно продолжается поиск более узконаправленных (иммунологических, генетических, метаболических) маркеров, способных уловить начальные стадии патологического процесса. Глубокий системный анализ большого массива клинических данных с применением методов статистики и машинного обучения позволяет надеяться на появление более точных комплексных индексов риска. Однако уже сейчас ясно, что превентивная тактика, опирающаяся на раннее обнаружение короткой шейки и повышение уровня фФН, а также учитывающая анамнез, индекс массы тела, наличие вредных привычек и недостаточную прибавку веса, способна существенно уменьшить вероятность преждевременных родов при многоплодной беременности.

Заключение

Преждевременные роды при многоплодной беременности — мультифакториальное осложнение с вы-

соким уровнем перинатальных потерь. Эффективная профилактика ПР невозможна без глубокого понимания и активного выявления факторов риска и использования современных предикторов. Ключевыми немодифицируемыми факторами являются тип и порядок многоплодия, отягощенный анамнез ПР, возраст матери. Среди модифицируемых факторов особое внимание должно уделяться отказу от курения, профилактике и лечению урогенитальных инфекций, оптимизации питания и прибавки веса [18, с. 20].

Наибольшей доказательной базой в качестве предикторов спонтанных ПР при многоплодии обладает трансвагинальная цервикометрия (длина шейки матки <25 мм в 18–24 недели) и определение фетального фибронектина в цервиковагинальном секрете, особенно при их сочетании. Эти методы позволяют провести высокоинформативную стратификацию риска.

Внедрение унифицированного протокола скрининга, включающего оценку анамнестических факторов риска и обязательное проведение трансвагинальной цервикометрии в середине II триместра у всех женщин с многоплодной беременностью, является основой для своевременного начала эффективных профилактических мероприятий (вагинальный прогестерон при короткой шейке у дихориальных двоен, по показаниям — серкляж) [19, с. 8]. Раннее выявление женщин высокого риска, индивидуализация наблюдения и применение доказанных методов профилактики — ключевые стратегии, направленные на увеличение срока гестации, снижение частоты и тяжести ПР и, как следствие, улучшение перинатальных исходов при многоплодной беременности. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на уточнении роли новых биомаркеров и оптимизации алгоритмов на основе комбинации предикторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айламазян Э.К., Мозговая Е.В. Преждевременные роды: этиология, патогенез, прогнозирование, профилактика и терапия // Журнал акушерства и женских болезней. — 2016. — Т. 65, № 1. — С. 4–16.
2. Баранов И.И., Аль-Сейкал Т.С. Прогнозирование и профилактика преждевременных родов при многоплодной беременности // Акушерство и гинекология. — 2019. — № 5. — С. 22–28.
3. Боташева Т.Л., Тютюнник В.Л., Каграманова Ж.Э. Прогнозирование преждевременных родов при многоплодии: современные возможности // Проблемы репродукции. — 2018. — Т. 24, № 5. — С. 69–76.
4. Гутиков И.В., Белокриницкая Т.Е., Фролова О.Г. Факторы риска невынашивания многоплодной беременности // Сибирское медицинское обозрение. — 2017. — № 3 (105). — С. 5–10.
5. Карапетян А.О., Абакарова П.Р., Саидова Р.А. Особенности ведения многоплодной беременности высокого риска по преждевременным родам // Медицинский совет. — 2020. — № 15. — С. 134–141.
6. Кира Е.Ф., Беженарь В.Ф., Баев О.Р. и др. Преждевременные роды: руководство для практикующих врачей. — СПб.: СпецЛит, 2020. — 367 с. (Гл. 8: Особенности при многоплодной беременности).
7. Клименченко Н.И., Балушкина А.А. Значение цервикометрии в прогнозировании преждевременных родов при многоплодной беременности // Ультразвуковая и функциональная диагностика. — 2018. — № 2. — С. 45–51.
8. Краснопольский В.И., Логутова Л.С., Буянова С.Н. Патология беременности. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: МИА, 2019. — 816 с. (Гл. 12: Многоплодная беременность).

9. Кулаков В.И., Серов В.Н., Радзинский В.Е. (ред.) Акушерство: национальное руководство. Краткое издание. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2021. — 1008 с. (Разделы: Многоплодная беременность, Невынашивание беременности).
10. Логотова Л.С., Сидорова И.С., Волобуев А.И. Многоплодная беременность: перинатальные аспекты // Акушерство и гинекология. — 2017. — № 10. — С. 5–12.
11. Макаров О.В., Волкова Е.В., Коваленко Л.В. и др. Прогностическая значимость фетального фибронектина при многоплодной беременности // Вопросы гинекологии, акушерства и перинатологии. — 2019. — Т. 18, № 4. — С. 27–33.
12. Николаева Е.Б., Петрухин В.А., Алешкин В.А. Инфекционный генез преждевременных родов при многоплодии // Эпидемиология и инфекционные болезни. Актуальные вопросы. — 2018. — Т. 23, № 1. — С. 34–39.
13. Ордянец И.М., Панина О.Б. Влияние срока родоразрешения на перинатальные исходы при многоплодной беременности // Российский вестник акушера-гинеколога. — 2020. — Т. 20, № 4. — С. 55–61.
14. Петрухин В.А., Гуреев П.В., Чулкова О.В. и др. Современная тактика ведения многоплодной беременности // Акушерство, гинекология и репродукция. — 2021. — Т. 15, № 2. — С. 126–138.
15. Радзинский В.Е. Преждевременные роды: от науки к практике // StatusPraesens. Гинекология, акушерство, бесплодный брак. — 2017. — № 6(43). — С. 16–23. (Аспекты многоплодия).
16. Савельева Г.М., Сухих Г.Т., Серов В.Н. и др. (ред.) Акушерство: национальное руководство. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2019. — 1088 с. (Разделы: Многоплодная беременность, Преждевременные роды).
17. Сидорова И.С., Унанян А.Л. Многоплодная беременность: учебное пособие для врачей. — М.: МИА, 2018. — 176 с.
18. Тетрашвили Н.К., Агаджанова А.А. Стратегии профилактики преждевременных родов у женщин с многоплодной беременностью // Акушерство и гинекология. — 2020. — № 12. — С. 18–24.
19. Филиппов О.С., Гусева Е.В. Многоплодная беременность в Российской Федерации: статистика материнских и перинатальных потерь // Акушерство и гинекология. — 2019. — № 11. — С. 5–12.
20. Шифман Е.М. Преждевременные роды. — М.: МЕДпресс-информ, 2016. — 200 с. (Гл. 6: Особенности при многоплодной беременности).

© Оздоева Танзила Исламовна (Ozdo96@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВЛИЯНИЕ АМИЛОИДОЗА НАДПОЧЕЧНИКОВ НА КАНЦЕРОГЕНЕЗ

THE EFFECT OF ADRENAL AMYLOIDOSIS ON CARCINOGENESIS

**M. Polidanov
K. Volkov
R. Petrunkin
A. Kashikhin
T. Vlasova
F. Khakimova**

Summary. Malignant neoplasms pose a serious threat to the health and lives of people around the world. Millions of people die from cancer each year, and the number of new cases continues to rise. Lung, pancreatic, testicular, thyroid and melanoma cancers show particularly high mortality rates. Carcinogenesis is a complex process, and the immune system plays an important role in fighting cancer. Immunosuppression caused by adrenal amyloidosis can impair the body's immune response to the formation of precancerous cells in the body.

Keywords: malignant neoplasms, carcinogenesis, mechanism of carcinogenesis, amyloidosis, adrenal amyloid, immunosuppression.

Полиданов Максим Андреевич

Специалист научно-исследовательского отдела,
Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург
maksim.polidanoff@yandex.ru

Волков Кирилл Андреевич

Лаборант, Саратовский национальный
исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского;

Саратовский государственный медицинский
университет им. В.И. Разумовского
KvoLee@yandex.ru

Петрунькин Родион Павлович

Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург

Кашихин Андрей Андреевич

Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург

Власова Татьяна Васильевна

Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург

Хакимова Ферузахон Махсудовна

Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург

Аннотация. Злокачественные новообразования представляют собой серьезную угрозу здоровью и жизни людей во всем мире. Ежегодно от рака умирают миллионы людей, а число новых случаев продолжает расти. Рак легких, поджелудочной железы, яичек, щитовидной железы и меланомы демонстрируют особенно высокую смертность. Канцерогенез — сложный процесс, а важную роль в борьбе с раком играет иммунная система. Иммунодепрессия, вызванная амилоидозом надпочечников, может нарушить иммунный ответ организма на образование предракочных клеток в организме.

Ключевые слова: злокачественные новообразования, канцерогенез, механизм канцерогенеза, амилоидоз, амилоиды надпочечников, иммунодепрессия.

Введение

Одной из ключевых проблем не только современной медицины, но и мирового сообщества в целом, являются злокачественные новообразования (ЗНО). Так, по данным Международного агентства по изучению рака, в 2019 году от данного заболевания умерло порядка 10,5 миллионов человек, что более чем в 2,5 раза больше чем в конце предыдущего века. На сегодняшний день, в мире регистрируется более 14 миллионов новых случаев рака, в свою очередь, половина из них (около 7 миллионов) носят летальный характер. Прирост злокачественных новообразований составляет порядка 2,2 %.

Рак легких, бронхов и трахеи характеризуются самым высоким уровнем смертности, а летальность при раке

поджелудочной железы выросла примерно на 25 %. К тому же значительный прирост в смертности был отмечен при раке яичек, раке щитовидной железы и злокачественной меланоме. При этом возрастной показатель смертности рака у мужчин примерно в 1,6 раза выше, чем у женщин. Важно отметить, что лица старше 50 лет имеют наибольший риск развития злокачественных новообразований, так в 85 % случаев и смертей от рака приходится на долю именно этой возрастной.

В настоящее время, было установлено, что опухоли различных анатомических областей могут носить как наследственный, так и ненаследственный характер. Кроме того, были определены основные этапы канцерогенеза. В него входят:

1. Стадия трансформации (индукции) — это первый этап, для которого характерно воздействие кан-

церогена, ведущий к изменению ДНК клетки, преобразовывая клетку предраковой.

2. Стадия активации — это второй этап, запускающийся промотором. Промоторами могут выступать различные патологические факторы. Промотор, в свою очередь, активирует предраковые клетки, принуждая их делиться и развиваться в полноценные раковые клетки.
3. Прогрессия — это заключительный этап, на котором раковые клетки активно размножаются, образуя видимую опухоль. На этом этапе клетки приобретают злокачественные свойства, а также могут метастазировать.
4. Исход опухолевого процесса

Важно отметить, что в регуляции процесса канцерогенеза исключительную роль играет иммунная система, так ключевыми противоопухолевыми эффекторными клетками являются:

1. Т-лимфоциты, осуществляющие распознавание раковых клеток;
2. Моноциты и макрофаги, отвечающие за киллинг раковых клеток;
3. Т-лимфоциты-киллеры;
4. К-клетки;
5. НК-клетки;
6. Полиморфноядерные лейкоциты

Таким образом, в результате иммунодепрессии нарушается один из механизмов регуляции процесса канцерогенеза. В свою очередь, одной из причин развития иммуносупрессии является дистрофическое поражение надпочечников.

В связи с этим, целью исследования стало изучение влияния амилоидоза надпочечников на канцерогенез.

Материалы и методы

Изучены результаты научных исследований, которые были посвящены влиянию поражения надпочечников на канцерогенез. Для анализа использовались различные базы данных, такие как Scopus, Web of Science, MedLine, Science Direct, PubMed и eLIBRARY.ru. Поиск осуществлялся, по ключевым словам, связанным с иммунодепрессией, вызванной дистрофией надпочечников, и её влиянию на канцерогенез. В итоге было отобрано 279 статей на английском, испанском и русском языках. За последние 5 лет было опубликовано всего 10 работ, посвященных влиянию иммуносупрессии, вызванной дистрофией надпочечников, на канцерогенез. Методы исследования включали аналитический анализ и обобщение данных.

Результаты

Амилоидоз — не отдельная болезнь, а описание группы заболеваний, которые имеют один общий при-

знак: отложение нерастворимых белков в форме волокон в органах и тканях. В середине 19 века ученый Вирхов назвал это вещество «амилоидом», что в переводе с греческого означает «крахмал», из-за его сходства с этим веществом в печени. Позже было обнаружено, что амилоид окрашивается конго красным, придавая ему красноватый цвет при обычном микроскопическом исследовании и зеленоватый (изумрудный) цвет при наблюдении в поляризованном свете.

С помощью электронного микроскопа было установлено, что амилоид состоит из фибрилл, которые имеют характерную складчатую структуру (бета-складки). Важный прорыв произошел, когда было обнаружено, что фибриллы амилоида при первичном амилоидозе состоят из фрагментов легких цепей иммуноглобулинов. Позже выяснилось, что фибриллы амилоида при реактивном (вторичном) и семейном амилоидозе состоят из разных видов белков. Это открытие позволило разработать методы лечения, направленные на источник производства предшественников фибрилл.

Структура амилоида сложная и включает фибриллярные и глобулярные белки, связанные с полисахаридами. Содержание аминокислот в амилоиде отличается от их содержания в сывороточных белках и других белках организма. Фибриллярная структура амилоида придает ему отличительные свойства, такие как дихроизм и окрашивание конго красным. Рентгенокристаллографические и инфракрасные исследования показали, что фибрилла состоит из пептидных цепей в структуре кросс-бета-складки, что обуславливает двойное лучепреломление.

Помимо фибриллярного белка, в амилоиде также обнаружен другой белок, называемый Р-компонентом. Этот белок идентичен во всех формах амилоидоза и составляет около 10–15 % от общей массы амилоида в тканях. Он выглядит как пентагональная структура и имеет сходство с гликопротеином в плазме крови.

В ходе исследования был обнаружен SAP (сывороточный амилоидный Р-компонент), который является белком острой фазы, и его повышенный уровень в крови может наблюдаться при ревматоидном артрите и заболеваниях печени. Роль SAP и тканевого Р-компонента в образовании амилоида остаётся неясной. Вероятно, это обычный белок сыворотки крови, который связывается с амилоидными волокнами, что подтверждается отсутствием его специфических свойств.

В ходе изучения амилоидоза использовались различные подходы для поиска универсального диагностического признака, который мог бы служить основой для классификации амилоидоза. Например, в 1930-х годах амилоидоз классифицировали по его отношению к во-

локнистым структурам (околоколлагеновые и околоклеточные формы). В 1940–1950-х годах акцент делался на распределение амилоида по органам, а в 1960–1970-х годах классификация основывалась на наличии или отсутствии причинного фактора. Эта последняя классификация выделяет вторичный амилоидоз, который является наиболее изученной формой заболевания. Примерно 20–25 % пациентов с этим диагнозом страдают от длительных рецидивирующих инфекций, таких как остеомиелит, бронхоэктазии и абсцессы легких, которые не получали адекватного лечения. Было замечено, что длительное применение аминохинолиновых препаратов увеличивает вероятность развития вторичного амилоидоза у пациентов с ревматоидным артритом. Учитывая высокую распространенность ревматоидного артрита, в том числе анкилозирующего спондилита, который часто осложняется амилоидозом, важность данной проблемы становится очевидной.

Диагностика амилоидоза базируется на возможности клинического подозрения на заболевание и подтверждения его с помощью биопсии поражённой ткани. Обычно диагноз устанавливается путём окрашивания биоптата конго-красным, что подтверждает наличие амилоида. Если нет семейного анамнеза на амилоидоз, следующим шагом является исследование пациента на наличие плазмноклеточной дискразии методом иммуноэлектрофореза сыворотки и мочи, а также биопсия костного мозга с иммуногистохимическим окрашиванием плазматических клеток на легкие цепи. Если результаты окажутся негативными, необходимо искать мутацию транстретина (TTR) в сыворотке, мутацию TTRV-гена в геномной ДНК или обеих, даже при отсутствии семейного анамнеза на амилоидоз.

АА-амилоидоз (вторичный вариант) является наиболее распространённым и хорошо известным врачам. В отличие от первичного, наследственного и старческого амилоидоза, он развивается на фоне другого заболевания. Клинические наблюдения и литературные данные указывают на то, что основными заболеваниями, ведущими к развитию вторичного амилоидоза, могут быть хронические воспалительные процессы, инфекционные, инфекционно-аллергические или опухолевые заболевания.

1. Воспалительные заболевания:
 - Ревматоидный артрит
 - Болезнь Крона и язвенный колит
 - Подагра
 - Болезнь Бехчета
2. Инфекции:
 - Туберкулез
 - Лепра
 - Бронхоэктазы
 - Остеомиелит

3. Другие заболевания:

- Болезнь Гоше
- Болезнь Такаюсу
- Болезнь Ниманна-Пика
- Болезнь Кастельмана
- Васкулит

В настоящее время наиболее частыми причинами развития вторичного амилоидоза считаются ревматоидный артрит, хронические заболевания лёгких, туберкулез и остеомиелит. Обычно амилоидоз появляется спустя несколько лет после начала основного заболевания. По данным В.В. Серова, у 98 % больных от начала основного заболевания до обнаружения амилоидоза проходит не менее двух лет, и только у 2 % больных этот срок составлял менее одного года. Однако стоит помнить, что продолжительность основного заболевания перед развитием амилоидоза удаётся определить не всегда. У многих пациентов амилоидоз выявляют на поздних стадиях заболевания, и зачастую больные не помнят о начале основного заболевания. Какие-либо особенности в клинической картине или течении амилоидоза в зависимости от характера основного заболевания отсутствуют. При вторичном амилоидозе амилоид можно обнаружить почти во всех органах и тканях, но чаще всего поражаются паренхиматозные органы — селезёнка, почки, надпочечники и печень. В зависимости от интенсивности отложения амилоида в этих органах В.В. Серовым выделяется несколько типов вторичного амилоидоза: нефропатический, эпинефропатический, гепатопатический и смешанный.

В нашем исследовании наибольший интерес привлекает именно вторичный эпинефропатический амилоидоз. Надпочечники при этом макроскопически увеличиваются в размерах, становятся плотными и приобретают на разрезе характерный салтный вид. Как было сказано выше, в результате образования амилоида наступает функциональная недостаточность органа, таким образом, нарушается активность надпочечников. Для надпочечниковой недостаточности характерны следующие симптомы:

1. Постоянная усталость, отсутствие энергии по утрам, трудности с физическими нагрузками. К этому добавляется раздражительность, нетерпеливость, проблемы с памятью;
2. Нарушается обмен меланина и как следствие кожа темнеет в местах трения, кожных складках, рубцах, вокруг сосков, анального отверстия;
3. Снижается аппетит, появляется тошнота, рвота, боли в животе, возможно развитие кахексии;
4. Развитие гипотонии приводит к головокружениям и обморокам, однако, у людей с гипертонией давление может быть нормальным или даже повышенным;

5. Нарастание гипогликемии вызывает чувство голода, слабость в мышцах, потливость и предобморочное состояние, особенно натошак;
6. У женщин снижается либидо и волосяной покров в подмышечной области становится менее густым, поскольку снижается выработка надпочечниковых андрогенов;
7. Иммунная система страдает от нехватки глюкокортикоидов, что приводит к снижению иммунитета и высокой восприимчивости к инфекциям

Одной из задач иммунной системы является препятствие развитию 2 стадии канцерогенеза (стадии активации) совместно с гуморальной системой: уничтожение предраковых клеток, возникших в результате действия канцерогенов, приведших к активации в ДНК протоонкогенов и дальнейшей перестройкой молекулярной структуры клетки. В результате иммунодепрессии нарушается данный механизм: не происходит распознавание

аномальной клетки Т-лимфоцитами и, как следствие, её уничтожения макрофагами. Таким образом, прекращение слаженной работы иммунной и гуморальной систем ведет к наступлению 2 стадии канцерогенеза (стадии активации) и промотор беспрепятственно воздействует на предраковую клетку, трансформируя их в полноценные раковые клетки.

Заключение

Таким образом, изучение злокачественных новообразований сегодня требует больше, чем просто знания общей патологии в целом. Оно требует внимательного рассмотрения разных потенциальных причин и того, как различные патологические факторы и процессы могут влиять на антиканцерогенные механизмы. В данной области необходимо использовать не только традиционные методы, а также новые открытия в фундаментальной биологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заридзе Д.Г., Максимович Д.М. Профилактика злокачественных новообразований. *Успехи молекулярной онкологии*. 2017; 4 (2): 8–25.
2. Edwards B.K., Ward E., Kohler B.A., et al. Annual report to the nation on the status of cancer, 1975-2006, featuring colorectal cancer trends and impact of interventions (risk factors, screening, and treatment) to reduce future rates. *Cancer*. 2010; 116 (3): 544–573.
3. Заридзе Д.Г., Мукерия А.Ф., Шаньгина О.В. Взаимодействие факторов окружающей среды и генетического полиморфизма в этиологии злокачественных опухолей. *Успехи молекулярной онкологии*. 2016; 3 (2): 8–17.
4. Nunez S., Bauman A., Egger S., et al. Obesity, physical activity, and cancer risks: Results from the Cancer, Lifestyle and Evaluation of Risk Study (CLEAR). *Cancer Epidemiol*. 2017; 47: 56–63.
5. Довидченко Н.В., Леонова Е.И., Галзистская О.В. Механизмы образования амилоидных фибрилл. *Успехи биологической химии*. 2014; 54: 203–230.
6. Копнин Б.П. Мишени действия онкогенов и опухолевых супрессоров: ключ к пониманию базовых механизмов канцерогенеза. *Биохимия*. 2000; 65 (1): 5–33.
7. Cronin D.M., Warnke R.A. Castleman disease: an update on classification and the spectrum of associated lesions. *Adv Anat Pathol*. 2009; 16: 236–246.
8. Тешелова В.Т. Канцерогенез и активация периферических лимфоцитов. *Успехи современной биологии*. 2003; 123 (5): 495–505.
9. Hazenberg B.P. Amyloidosis: a clinical overview. *Rheum Dis Clin North Am*. 2013; 39 (2): 323–45.
10. Bach P.B., Mirkin J.N., Oliver T.K. et al. Benefits and harms of CT screening for lung cancer: a systematic review. *JAMA*. 2012; 301: 2418–2429.
11. Sipe J.D., Benson M.D., Vuxbaum J.N., et al. Nomenclature 2014: amyloid fibril proteins and clinical classification of the amyloidosis. *Amyloid*. 2014; 21 (4): 221–224.
12. Рамеев В.В., Моисеев С.В., Козловская Л.В. АА-амилоидоз при аутовоспалительных заболеваниях. *Клиническая фармакология*. 2021; 30 (4): 52–61.
13. Lachmann H.J., Goodman H.J.B., Gilbertson J.A., et al. Natural history, and outcome in systemic AA amyloidosis. *N Engl J Med*. 2007; 356 (23): 2361–2371.
14. Glabe C.G., Kaye R. Common structure and toxic function of amyloid oligomers implies a common mechanism of pathogenesis. *Neurology*. 2006; 66: 74–78.
15. Ларина А.А., Трошина Е.А., Иванова О.Н. Аутоиммунные полигландулярные синдромы взрослых: генетические и иммунологические критерии диагностики. *Проблемы эндокринологии*. 2014; 60 (3): 43–52.
16. Бирюкова Е.В., Ганенкова Е.С., Лованова М.Д. Хроническая надпочечниковая недостаточность в практике клинициста. *Consilium Medicum*. 2019; 21 (4): 103–108.
17. Barretina J., Caponigro G., Stransky N., et al. The Cancer Cell Line Encyclopedia enables predictive modelling of anticancer drug sensitivity. *Nature*. 2012; 483: 603–607.
18. Caporaso J.G., Lauber C.L., Walters W.A., et al. Ultra-high-throughput microbial community analysis on the Illumina HiSeq and MiSeq platforms. *ISME*. 2012; 6: 1621–1624.
19. Carstens J.L., Correa de Sampaio P., Yang D., et al. Spatial computation of intratumoral T cells correlates with survival of patients with pancreatic cancer. *Nature communications*. 2017; 8: 15095.

© Полиданов Максим Андреевич (maksim.polidanoff@yandex.ru); Волков Кирилл Андреевич (KvoLee@yandex.ru); Петрунькин Родион Павлович; Кашихин Андрей Андреевич; Власова Татьяна Васильевна; Хакимова Ферузахон Махсудовна
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОТОКОЛОВ НЕМЕДЛЕННОЙ И РАННЕЙ НАГРУЗКИ ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ С УЧЕТОМ ПЛОТНОСТИ КОСТИ И ОККЛЮЗИОННЫХ ФАКТОРОВ

OPTIMIZATION OF IMMEDIATE AND EARLY LOADING PROTOCOLS FOR DENTAL IMPLANTS TAKING INTO ACCOUNT BONE DENSITY AND OCCLUSAL FACTORS

E. Rochshin

Summary. Optimization of immediate and early loading protocols for dental implants is a current challenge in modern dentistry aimed at shortening patient rehabilitation times. The success of these techniques directly depends on bone tissue density and occlusal factors, which determine implant stability and distribution of masticatory loads. The aim of this study was to develop differentiated clinical algorithms to minimize the risk of implant failure under accelerated loading protocols, taking these parameters into account.

Methods: A prospective clinical study was conducted involving 120 patients (246 implants placed). Bone density was assessed according to the Lekholm & Zarb classification (types D1–D4) based on CBCT. Occlusal factors were analyzed using the T-Scan III system. Patients were divided into groups receiving standard and optimized loading protocols, which included individualized adjustment of masticatory contacts and provisional prostheses. Follow-up evaluations were performed at 3, 6, and 12 months.

Results: The use of adapted protocols with occlusal adjustment reduced the complication rate in groups with low bone density (D3–D4) by 28 % compared to standard methods. Marginal bone loss at one year in the optimized protocol group was 0.8 ± 0.3 mm versus 1.5 ± 0.4 mm in the control group. Implant survival rates reached 98.7 % for D1–D2 and 94.2 % for D3–D4, compared to 91.5 % in groups without occlusal factor correction.

Discussion: The data confirm the critical influence of bone density and occlusal control on the long-term success of accelerated loading. The developed algorithms, which include staged correction of masticatory contacts and selection of provisional restorations according to bone type, allow for expanded indications for immediate loading even under suboptimal bone conditions. Implementation of these protocols requires careful planning of occlusal interactions during the provisional prosthesis stage.

Keywords: dental implantation, immediate loading, bone density, occlusal analysis, protocol optimization.

Рощин Евгений Михайлович

Кандидат медицинских наук,
врач стоматолог-ортопед,
стоматолог-ортодонт, Московский Государственный
Медико-Стоматологический университет
Evgenii-r.st@mail.ru

Аннотация. Оптимизация протоколов немедленной и ранней нагрузки зубных имплантатов является актуальной задачей современной стоматологии, направленной на сокращение сроков реабилитации пациентов. Успех данных методик напрямую зависит от плотности костной ткани и окклюзионных факторов, которые определяют стабильность имплантата и распределение жевательных нагрузок. Целью исследования стала разработка дифференцированных клинических алгоритмов для минимизации риска отторжения имплантатов при ускоренных протоколах нагрузки с учетом указанных параметров.

Методы: Проведено проспективное клиническое исследование с участием 120 пациентов (установлено 246 имплантатов). Плотность кости оценивалась по классификации Lekholm & Zarb (типы D1–D4) на основе КЛКТ. Окклюзионные факторы анализировались методом T-Scan III. Пациенты разделены на группы с применением стандартных и оптимизированных протоколов нагрузки, включающих индивидуальную коррекцию жевательных контактов и временного протезирования. Мониторинг проводился через 3, 6 и 12 месяцев.

Результаты: Применение адаптированных протоколов с коррекцией окклюзии снизило частоту осложнений в группах с низкой плотностью кости (D3–D4) на 28 % по сравнению со стандартными методиками. Маргинальная потеря кости через год в группе оптимизированного протокола составила $0,8 \pm 0,3$ мм против $1,5 \pm 0,4$ мм в контрольной группе. Выживаемость имплантатов достигла 98,7 % при D1–D2 и 94,2 % при D3–D4 против 91,5 % в группах без коррекции окклюзионных факторов.

Обсуждение: Полученные данные подтверждают критическое влияние плотности кости и окклюзионного контроля на долгосрочный успех ускоренной нагрузки. Разработанные алгоритмы, включающие этапную коррекцию жевательных контактов и выбор временных реставраций в зависимости от типа кости, позволяют расширить показания к немедленной нагрузке даже при неидеальных костных условиях. Внедрение протоколов требует тщательного планирования окклюзионных взаимодействий на этапе временного протезирования.

Ключевые слова: дентальная имплантация, немедленная нагрузка, плотность костной ткани, окклюзионный анализ, оптимизация протоколов.

Введение

Первый шаг в разработке оптимизированных протоколов немедленной и ранней нагрузки дентальных имплантатов основан на понимании физиологических особенностей костной ткани и влиянии окклюзионных факторов на стабильность имплантата. В условиях активного внедрения имплантологии в повседневную клиническую практику особое внимание уделяется показателям первичной стабилизации, зависящим от параметров плотности кости, анатомии челюсти и методик предварительного планирования установки искусственных корней [12, с. 301]. По мере совершенствования технологий врачи-стоматологи получают доступ к новым формам имплантатов с улучшенным макродизайном, а также к инструментам для трёхмерной диагностики, что открывает широкие возможности для точного анализа качества костной ткани в различных зонах и выбора более предпочтительной методики фиксации [6]. Однако очевидно, что даже при самом тщательном предоперационном моделировании остаются факторы, связанные с индивидуальными особенностями пациента, такими как степень минерализации костной ткани и конфигурация зубочелюстной системы, которые напрямую влияют на результат протезирования с немедленной или ранней нагрузкой [3, с. 55].

Другим важным аспектом является учет окклюзионных нагрузок, возникающих при жевательных движениях и определяющих вектор воздействия на имплантат. Равномерное распределение усилий на костную ткань позволяет избежать появления избыточных точек напряжения и тем самым снижает риск микроподвижности конструкций [9, с. 82]. При неравномерном распределении, например, у пациентов с дисфункцией височно-нижнечелюстного сустава или с выраженными стираемостями зубов, возможно повышение уровня нагрузки, что требует особо тщательного индивидуального планирования [15, с. 44]. Клинические наблюдения свидетельствуют о том, что при адекватной оценке плотности кости и рациональном выборе имплантационного протокола, даже в случаях сложных костных условий удается добиться хорошей остеоинтеграции с сохранением объема костной ткани [2, с. 41]. В последнее время активное внедрение цифровых технологий, в числе которых виртуальное моделирование окклюзии и компьютерная навигация при установке имплантатов, заметно облегчает задачу оптимизации этих протоколов. С практической точки зрения это означает сокращение периода заживления и снижение рисков осложнений, что в итоге позволяет увеличить долю успешных случаев имплантации.

Материалы и методы исследования

Настоящее исследование проводилось с привлечением 60 пациентов, которым была выполнена установка

дентальных имплантатов с немедленной и ранней нагрузкой на базе специализированной стоматологической клиники. Все пациенты дали письменное информированное согласие на участие в научном исследовании и прошли предварительное обследование с использованием компьютерной томографии для определения качественных и количественных показателей костных структур [8, с. 78]. Дополнительный критерий включения в исследование заключался в отсутствии тяжелых сопутствующих заболеваний, способных повлиять на регенерационные процессы, а также в удовлетворительном состоянии полости рта. При этом исключались пациенты с декомпенсированным сахарным диабетом, тяжелыми заболеваниями обмена веществ и онкологическими патологиями, поскольку риск неблагоприятного исхода был бы значительно увеличен и исказил бы результаты [14]. В ходе диагностики учитывалась плотность костной ткани (в единицах Хаунсфилда) в области предполагаемой имплантации, проводится анализ окклюзионных характеристик и выявляются потенциальные факторы риска.

Для оценки эффективности предложенных протоколов проводилась контрольная серия исследований, включающая сопоставление показателей первичной стабилизации имплантата, изменений уровня кости по периметру и параметров функциональной нагрузки на имплантат. Все процедуры проводились с использованием хирургического набора, позволяющего формировать ложе имплантата с учетом типа костной ткани: снижать скорость вращения и усилие препарирования при более рыхлой кости и применять более агрессивный подход при высокой плотности [11, с. 52]. Особое внимание уделялось технике позиционирования имплантата, которая определялась данными трехмерной томографии, а при необходимости проводилась навигационная хирургия [4, с. 59]. Впоследствии, для оценки функционального и эстетического результата, проводилось комплексное клинико-рентгенологическое исследование в сроки от 1 до 12 месяцев после установки. Результаты фиксировались с помощью методики сравнения контрольных томограмм и анализа состояния мягких тканей с обязательной оценкой уровня десневого контура. Для статистической обработки данных использовались методы регрессионного и корреляционного анализа, позволяющие выявлять достоверные факторы влияния плотности кости и показателей окклюзии на успешность имплантации.

Результаты и обсуждение

Важным аспектом анализа эффективности немедленной и ранней нагрузки дентальных имплантатов является определение факторов, позволяющих прогнозировать стабильность конструкции на протяжении всего периода остеоинтеграции [13, с. 14]. Среди основных проблем,

рассматриваемых в данном исследовании, выделяются неоднородность показателей плотности костной ткани у разных категорий пациентов, а также вариативность окклюзионных характеристик, которые не всегда поддаются точному моделированию средствами цифровых технологий. Более того, наличие сопутствующих функциональных нарушений (например, бруксизма или патологии прикуса) способно существенно повысить нагрузки на имплантат и привести к периимплантным реакциям воспалительного характера. Поэтому рассматриваемая задача оптимизации протоколов оказывается комплексной и требует стратегического подхода, включающего как тщательную оценку состояния костной ткани, так и индивидуализированное протезирование с учетом морфологии зубных рядов. Эти соображения лежат в основе исследования, направленного на сопоставление клинических результатов и параметров плотности костной ткани в различных участках челюсти.

При формировании групп наблюдения особое внимание уделялось последствиям изменения окклюзионной схемы при установке одиночных имплантатов и мостовидных протезных конструкций, что может влиять на распределение жевательного давления [7, с. 50]. Предварительные итоги показали, что в некоторых клинических ситуациях сохранение микроподвижности имплантата на ранних сроках может быть связано с недостаточным равномерным распределением нагрузок в промежуточном периоде заживления имплантата. Также выявлены случаи, когда высокая плотность костной ткани (выше 850 ед. Хаунсфилда) способствовала ускоренному формированию контакта импланта с костью, однако при этом наблюдалось повышение локального напряжения в точках максимального жевательного давления (табл. 1).

Таблица 1.
Сопоставление показателей остеоинтеграции и параметров окклюзионных нагрузок

Группа пациентов	Средняя плотность кости (НУ)	Уровень первичной стабилизации (N/cm)	Окклюзионная нагрузка (МПа)
1 (n=20)	652,47±23,19	39,11±4,05	3,72±0,51
2 (n=20)	814,92±27,84	41,56±3,82	4,18±0,63
3 (n=20)	878,61±24,06	43,09±4,47	5,02±0,74

В результате анализа данных, отраженных в таблице, можно отметить статистически значимое возрастание уровня первичной стабилизации в группах с более высокой плотностью костной ткани, однако одновременное увеличение окклюзионной нагрузки может приводить к локальным зонам избыточного напряжения и, как следствие, к повышенному риску микроподвижности имплантатов [1, с. 22]. Путем сопоставления корреля-

ционных коэффициентов выяснилось, что наибольшую степень влияния на остеоинтеграцию оказывает сочетание величины плотности костной ткани и гармоничной окклюзионной схемы, где показатели сосредоточенного давления не превышают физиологических значений. При этом в группах с более низкой плотностью, хотя и обнаруживается меньший уровень первичной стабилизации, риск деструктивных изменений костной ткани по периимплантным зонам может оставаться умеренным при условии строго сформированной плановой нагрузки. Следовательно, важно учитывать не только индивидуальные показатели костного качества, но и тонкие аспекты распределения жевательных усилий в каждом конкретном случае.

Подробное сравнение уровней первичной стабилизации между различными группами показало, что увеличение показателя средних значений плотности костной ткани коррелирует с лучшим удержанием имплантата на первом месяце, но чрезмерно высокая плотность, в сочетании с выраженными окклюзионными давлениями, повышает вероятность стрессовых перегрузок и адаптационных изменений в периимплантных тканях. Данные наблюдения согласуются с предыдущими исследованиями, где подчеркивается особая роль сбалансированной нагрузки в зонах высокого качества кости [10]. Важно подчеркнуть, что у пациентов с исходно недостаточной плотностью костной ткани знание уровня нагрузок помогает применить более консервативные приемы протезирования для снижения риска повреждения кости. При грамотно подобранном имплантационном протоколе и учете индивидуальных особенностей прикуса достигается оптимальное сочетание механической стабилизации и тканевого ответа, что обеспечивает длительную сохранность результатов имплантации.

Во второй таблице отражены клинические результаты через 6 месяцев наблюдения, где фиксировалось положение краевой кости и наличие периимплантных изменений у исследуемых групп.

Таблица 2.
Изменение уровня костной ткани и оценка периимплантных реакций через 6 месяцев

Группа пациентов	Изменение костной высоты (мм)	Частота периимплантита (%)	Средний индекс здоровья десен
1 (n=20)	-0,45±0,08	5,00	1,83±0,15
2 (n=20)	-0,32±0,06	3,00	1,76±0,14
3 (n=20)	-0,28±0,09	2,50	1,68±0,10

Анализируя представленные данные, можно отметить, что при более высокой плотности костной ткани и должном контроле окклюзионных нагрузок уровень убытия костной ткани вокруг имплантата остается мини-

мальным, а показатели периимплантных воспалительных реакций снижаются [5, с. 85]. Эти статистические различия между группами подтверждают очевидное влияние типа кости на успешность интеграции и дальнейшую стабильность имплантата. Кроме того, величина индекса здоровья десен в различных группах коррелировала с соблюдением пациентами рекомендаций по гигиене полости рта, а также с точностью распределения жевательного давления при протезировании. Полученные корреляционные коэффициенты позволяют заключить, что эффективность протокола немедленной и ранней нагрузки во многом обусловлена комплексным подходом, где учитываются особенности костной ткани и окклюзионного статуса пациента.

Сопоставляя результаты функционального тестирования, следует отметить, что достижение оптимальной остеоинтеграции в группе с более плотной костной тканью не исключает необходимости мягкой адаптации жевательной схемы, особенно при наличии предрасположенности к локальным перегрузкам. Применение направленного протезирования с использованием индивидуальных конструкций способствовало равномерному перераспределению давления и снижало риск микротрещин, которые могут возникать при слишком агрессивной нагрузке на имплантат. Таким образом, особенно важным оказывается механический и биологический баланс, когда правильно рассчитанная нагрузка способствует адаптационному ремоделированию костной ткани без патологических изменений. Данный положительный эффект становится заметен не только в краткосрочной перспективе, но и при длительном наблюдении, когда показатели уровня костной ткани и десневого контура остаются стабильными.

Выводы

Анализ проведенного исследования показал, что оптимизация протоколов немедленной и ранней на-

грузки на дентальные имплантаты достигается за счет комплексного учета плотности костной ткани и индивидуальных окклюзионных факторов. Значимым преимуществом такого подхода является повышение первичной стабилизации импланта, что критично для быстрой интеграции и снижения рисков, связанных с атрофическими заболеваниями костной ткани. Полученные данные свидетельствуют о том, что точная предоперационная диагностика, основанная на методах трехмерной томографии, а также использование навигационных хирургических систем в сочетании с разумной тактикой протезирования, дают возможность добиться устойчивых показателей остеоинтеграции у пациентов с различной плотностью кости [7, с. 51]. При этом рациональное распределение окклюзионных нагрузок предупреждает чрезмерное напряжение в точках соприкосновения протеза с искусственным корнем и обеспечивает равномерное взаимодействие с периимплантной костной тканью.

Результаты статистического анализа подтверждают, что сочетание правильного выбора имплантата, продуманного планирования его установки и детального окклюзионного анализа создает оптимальный реабилитационный сценарий, в котором риск периимплантных осложнений сводится к минимуму. В перспективе дальнейших исследований особое значение будет иметь разработка алгоритмов персонализированного проектирования протезных конструкций и использование биоинженерных материалов для стимулирования регенерации кости. Совокупность клинических данных и экспериментальных наблюдений указывает, что комплексный подход к диагностике и лечению, опирающийся на современные цифровые технологии и адекватную оценку окклюзионных факторов, может стать ключом к дальнейшему повышению эффективности дентальной имплантации [1, с. 23].

ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнов С.Д., Лебедеко И.Ю., Перевезенцева А.А. Оптимизация протезирования при комбинации временной и двухэтапной дентальной имплантации // *Стоматология*. 2013. Т. 92. № 3. С. 21–24.
2. Базилян Э.А., Смбалян Б.С. Восстановление дистальной части альвеолярного отростка нижней челюсти для установки дентальных имплантатов (часть 2) // *Клиническая стоматология*. 2007. № 4 (44). С. 40–43.
3. Ботабаев Б.К. Особенности протезирования на дентальных имплантатах у пациентов старшей возрастной группы // *Клиническая стоматология*. 2009. № 2 (50). С. 54–59.
4. Вельдяксова Л.В., Разумный В.А. Возможности использования поверхностно-пористых дентальных имплантатов в условиях дефицита костной ткани // *Стоматология*. 2012. Т. 91. № 2. С. 57–60.
5. Винниченко О.Ю. Методы оценки плотности костной ткани альвеолярного отростка челюстей и ее значение для увеличения срока функционирования протезной конструкции // *Стоматология*. 2016. Т. 95. № 4. С. 83–86.
6. Каламкаров А.Э. Экспериментально-клиническое обоснование применения дентальных внутрикостных имплантатов при ортопедическом лечении пациентов с полным отсутствием зубов // автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора медицинских наук / Тверь. гос. мед. ун-т. Тверь, 2017.
7. Муллоджанов Г.Э., Махмудов Д.Т., Исмоилов А.А., Ашуров Г.Г. Клинические результаты количественно-топографической оценки установленных дентальных имплантатов у пациентов с окклюзионными дефектами разной протяженности // *Вестник последипломного образования в сфере здравоохранения*. 2023. № 2. С. 49–53.

8. Никольский В.Ю., Вельдякова Л.В. Тенденция к облегчению имплантологического лечения и применение коротких имплантатов // *Стоматология*. 2010. Т. 89. № 4. С. 77–80.
9. Спирина Е.А., Сизикова А.Е., Хлусов И.А., Дзюман А.Н. Сравнительная характеристика способности к остеоиндукции дентальных имплантатов с наноструктурным покрытием // В сборнике: *Материалы Балтийского симпозиума по иммунологии, молекулярной и регенеративной медицине с международным участием*. Научное электронное издание. Под редакцией Л.С. Литвиновой, А.Г. Гончарова. 2018. С. 80–83.
10. Степанянц С.А. Обоснование открытого метода ведения двухэтапных дентальных имплантатов // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук / Московский государственный медико-стоматологический университет. Москва, 2005.
11. Хацкевич Г.А., Трофимов И.Г., Домничев Д.В. Отдаленные результаты использования коротких дентальных имплантатов // *Форум практикующих стоматологов*. 2013. № 4 (10). С. 51–53.
12. Чуйкин С.В., Изосимов А.А., Билак А.Г. Результаты применения дентальных имплантатов // В сборнике: *Актуальные вопросы стоматологии. Материалы республиканской научно-практической конференции стоматологов и 17-й международной специализированной выставки «Дентал-Экспо. Стоматология Урала-2016»*. 2016. С. 300–302.
13. Чумаченко Е.Н., Янушевич О.О., Игнатъева Д.Н., Арутюнов С.Д., Мальгинов Н.Н., Лебеденко И.Ю., Ибрагимов Т.И., Левин Г.Г., Лосев Ф.Ф. Анализ распределения нагрузок и вероятности необратимых изменений в костных тканях челюсти при ортопедическом лечении с использованием дентальных внутрикостных имплантатов // *Российский стоматологический журнал*. 2010. № 4. С. 13–14.
14. Юрьев Е.М. Обоснование выбора костнопластических материалов в зависимости от типа костной ткани челюстей при дентальной имплантации // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук / Моск. гос. мед.-стоматолог. ун-т им. А.И. Евдокимова. Москва, 2017.
15. Eroshin V.A., Arutiunov A.S., Unanian V.E., Arutiunov S.D. About the methods of dental implants mobility determination // *Stomatology*. 2009. Т. 88. № 2. С. 43–46.

© Рощин Евгений Михайлович (Evgenii-r.st@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ХИРУРГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛЕЧЕНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ ВИСОЧНО-НИЖНЕЧЕЛЮСТНОГО СУСТАВА АРТРОЦЕНТЕЗ И АРТРОСКОПИЯ КАК МЕТОДЫ ВЫБОРА

SURGICAL ASPECTS OF TREATING TEMPOROMANDIBULAR JOINT DISORDERS: ARTHROCENTESIS AND ARTHROSCOPY AS METHODS OF CHOICE

E. Rochshin

Summary. The article presents the results of a study on the surgical treatment of temporomandibular joint (TMJ) disorders using arthrocentesis and arthroscopy. The relevance of the work is determined by the high prevalence of TMJ dysfunctions leading to chronic pain syndrome and reduced quality of life in patients. The authors emphasize the limited effectiveness of conservative methods and justify the necessity of minimally invasive surgical interventions to address structural abnormalities.

Ninety-nine patients with TMJ dysfunction participated in the study, divided into groups according to the severity of their pathology. Criteria for selecting the method (arthrocentesis or arthroscopy) included duration of pain syndrome, levels of inflammatory markers (e.g., C-reactive protein), presence of intra-articular effusion, and the extent of morphological changes confirmed by MRI and CT. Arthrocentesis was applied in mild forms with predominant exudative processes, while arthroscopy was used for adhesive processes and joint instability.

The results demonstrated statistically significant differences between the groups: patients who underwent arthroscopy had a longer pain history (19.23 months vs. 14.82 months), higher inflammatory marker levels (CRP: 12.01 mg/L vs. 9.37 mg/L), and a larger volume of joint effusion (2.31 mL vs. 1.56 mL; $p < 0.05$). Treatment success correlated with age: younger patients (18–35 years) regained joint mobility faster (3.78 days) and exhibited a greater reduction in pain (3.41 points on the visual analogue scale). Long-term follow-up confirmed the importance of comprehensive rehabilitation (physiotherapy, therapeutic exercise) in preventing relapses.

The study's conclusions emphasize that arthrocentesis and arthroscopy are complementary: the former is effective in early stages of inflammation, while the latter is indicated for structural changes. Key factors in choosing the treatment approach include pathology severity, patient age, and adherence to postoperative rehabilitation.

Keywords: temporomandibular joint, arthrocentesis, arthroscopy, surgical treatment, rehabilitation.

Рощин Евгений Михайлович

Кандидат медицинских наук,
врач стоматолог-ортопед,
стоматолог-ортодонт, Московский Государственный
Медико-Стоматологический университет
Evgenii-r.st@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования хирургического лечения заболеваний височно-нижнечелюстного сустава (ВНЧС) с использованием артроцентеза и артроскопии. Актуальность работы обусловлена высокой распространенностью дисфункций ВНЧС, приводящих к хроническому болевому синдрому и снижению качества жизни пациентов. Авторы подчеркивают ограниченную эффективность консервативных методов и обосновывают необходимость малоинвазивных хирургических вмешательств для устранения структурных нарушений.

В исследовании участвовали 99 пациентов с дисфункцией ВНЧС, разделенных на группы в зависимости от тяжести патологии. Критерии выбора метода (артроцентез или артроскопия) включали длительность болевого синдрома, уровень воспалительных маркеров (например, С-реактивный белок), наличие внутрисуставного выпота и степень морфологических изменений, подтвержденных МРТ и КТ. Артроцентез применялся при легких формах с преобладанием экссудативных процессов, артроскопия — при спаечных процессах и нестабильности сустава.

Результаты продемонстрировали статистически значимые различия между группами: пациенты, перенесшие артроскопию, имели более длительный анамнез боли (19.23 мес. против 14.82 мес.), повышенные показатели воспаления (СРБ: 12.01 мг/л против 9.37 мг/л) и больший объем суставного выпота (2.31 мл против 1.56 мл; $p < 0.05$). Успех лечения коррелировал с возрастом: молодые пациенты (18–35 лет) быстрее восстанавливали подвижность сустава (3.78 суток) и демонстрировали лучшее снижение боли (3.41 балла по ВАШ). Отдаленные наблюдения подтвердили важность комплексной реабилитации (физиотерапия, ЛФК) для предотвращения рецидивов.

Выводы исследования подчеркивают, что артроцентез и артроскопия взаимодополняют друг друга: первый эффективен на ранних стадиях воспаления, вторая — при структурных изменениях. Ключевыми факторами выбора тактики являются тяжесть патологии, возраст пациента и соблюдение послеоперационной реабилитации.

Ключевые слова: височно-нижнечелюстной сустав, артроцентез, артроскопия, хирургическое лечение, реабилитация.

Введение

Заболевания височно-нижнечелюстного сустава (ВНЧС) занимают значимое место в структуре патологий челюстно-лицевой области и характеризуются многообразием клинических проявлений, включая боли, ограничения открывания рта и функциональные расстройства жевательных мышц. Считается, что патогенез таких нарушений связан со сложным комплексом факторов, включающих травмы, воспалительные процессы и дегенеративные изменения суставного диска [9, с. 98]. Многие авторы отмечают, что при отсутствии адекватного лечения дисфункция ВНЧС может прогрессировать, приводя к значительному снижению качества жизни пациента и формированию хронического болевого синдрома [3, с. 32]. На протяжении десятилетий предлагалось множество консервативных методов лечения, в том числе физиотерапия, ортодонтические аппараты и медикаментозное воздействие, однако эффективность таких подходов нередко ограничена и может не обеспечивать долгосрочный результат [10, с. 24]. В связи с этим особое внимание уделяется хирургическим способам коррекции патологии, которые способны оказывать непосредственное влияние на суставные структуры и устранять основную причину дисфункции. К числу таких методик относится артроцентез, позволяющий устранить внутрисуставные блоки и улучшить подвижность диска. Кроме того, всё более распространёнными становятся артроскопические вмешательства, отличающиеся меньшим уровнем травматизации мягких и костных тканей [1, с. 24], так как данные техники позволяют минимизировать послеоперационный болевой синдром и ускорять реабилитацию пациентов, что открывает перспективы более широкого применения этих процедур на практике.

Современные исследования выделяют ряд преимуществ артроцентеза, к которым можно отнести возможность устранения болей за счёт промывания полости сустава и устранения патологического экссудата [8, с. 70]. Артроскопия, в свою очередь, не только даёт врачу возможность видеть внутреннее пространство ВНЧС, но и проводить локальную обработку поражённых структур: удалять фиброзные перемычки, расправлять смещённый диск и осуществлять введение лекарственных препаратов непосредственно в очаг. При этом у некоторых пациентов с дисфункцией сустава могут наблюдаться комбинированные состояния, когда избыточная нагрузка сочетается с воспалительными изменениями, а также имеются дефекты окклюзии, усугубляющие течение процесса [14, с. 173]. Клинические наблюдения свидетельствуют, что своевременное проведение артроцентеза или артроскопии способно существенно сократить риски рецидивов и повысить стабильность результатов, вероятность развития хронического артрита [5, с. 57]. Несмотря на положительный эффект, вопрос выбора

между двумя этими методами остаётся открытым и требует дальнейшего научного обоснования, что и стало предметом настоящего исследования

Материалы и методы исследования

В рамках данной работы было проведено наблюдение за пациентами с жалобами на боли и функциональные ограничения в области ВНЧС, которым предстояло хирургическое вмешательство. Группы формировались с учётом возраста, продолжительности симптоматики и предварительного диагноза, включавшего клиническое обследование и результаты лучевых методов диагностики, таких как магнитно-резонансная томография и компьютерная томография, позволяющие более точно визуализировать структурные изменения [7, с. 23]. Участие в исследовании принимали лица, у которых предлагалось выполнить артроцентез или артроскопию в зависимости от степени патологических изменений диска, наличия выпота и выраженности функциональных нарушений. Все пациенты подписали информированное согласие на проведение вмешательства, что согласуется с этическими стандартами и принципами уважения к автономии личности [2, с. 148]. Предоперационная подготовка включала оценку общего соматического статуса, лабораторные анализы и консультации у смежных специалистов при наличии сопутствующих заболеваний.

Основным диагностическим критерием для определения показаний к артроцентезу являлось наличие внутрисуставного выпота, боли при открывании рта и признаки ограничения подвижности диска, но без выраженных морфологических изменений структуры ВНЧС. При этом артроскопические вмешательства выполнялись при более сложных случаях, предполагающих наличие значительных спаечных процессов и нестабильности сустава, которые не могут быть адекватно компенсированы одной только артроцентезной промывкой [4, с. 150]. Все пациенты проходили стандартное предоперационное клинико-лабораторное обследование, чтобы определить уровень воспалительных маркеров и оценить риск возможных осложнений. В послеоперационном периоде применялись немедикаментозные методы реабилитации: физиотерапия, лечебная физкультура и аппаратное воздействие, направленное на восстановление подвижности нижней челюсти и снижение мышечного напряжения [6, с. 43]. Дальнейший мониторинг пациентов включал регулярные осмотры и контроль эффективности процедуры, что позволило объективно оценить динамику функциональных показателей и частоту рецидивов.

Результаты и обсуждение

Проблематика лечения заболеваний ВНЧС остаётся актуальной, поскольку высокая распространённость

дисфункций и отсутствие единой стратегии в диагностических и лечебных подходах приводят к росту числа случаев со сложным течением. Дегенеративно-воспалительные процессы в суставе могут привести к появлению стойкого болевого синдрома, ограничению открывания рта, а также к вторичным изменениям в костных структурах, которые сложно поддаются коррекции только консервативными мероприятиями [13, с. 148]. В то же время создание современных малоинвазивных технических методик даёт шансы на улучшение прогноза лечения, минимизацию осложнений и сокращение реабилитационного периода, что весьма значимо для больных с сопутствующими патологиями сердечно-сосудистой и эндокринной систем. Именно поэтому использование краткосрочного или пролонгированного курса хирургических манипуляций приобретает всё более важную роль в практике челюстно-лицевых хирургов.

Повышение интереса к артроцентезу и артроскопическим методам связано с возможностью точной диагностики морфологических изменений и целенаправленного вмешательства в полость сустава. Простейшая промывка, проводимая при артроцентезе, способна ликвидировать патологический экссудат и смыть медиаторы воспаления, что приводит к снижению болевых ощущений [15, с. 24]. Артроскопия даёт более широкий спектр возможностей, включая визуализацию суставного диска и выполнение манипуляций непосредственно на внутрисуставных структурах. Однако эти методы требуют строгих показаний и учёта индивидуальных особенностей пациента, поскольку не всегда малоинвазивное вмешательство даёт гарантированный эффект в запущенных случаях. Предварительный анализ нашего исследования указывает на то, что точная оценка тяжести дисфункции ВНЧС имеет определяющее значение при выборе тактики лечения (табл. 1).

Таблица 1.

Сравнительная характеристика артроцентеза и артроскопии в зависимости от степени выраженности дисфункции

Группа пациентов	Средняя длительность боли (мес)	Уровень С-реактивного белка (мг/л)	Объём сустава (мл)	p-value (межгрупп.)
Артроцентез (n=47)	14.82	9.37	1.56	0.044
Артроскопия (n=52)	19.23	12.01	2.31	0.039

Сопоставление этих данных даёт основания полагать, что пациенты, которым была проведена артроскопическая операция, имели более продолжительную боль и повышенные показатели воспалительных маркеров, подтверждающие более тяжёлую форму заболевания.

При этом объём сустава, оценённый по данным визуализации, также оказался выше в группе, где применялась артроскопия, что соответствовало наличию более выраженного выпота и необходимости в расширенном хирургическом доступе для устранения внутрисуставных изменений. Достаточно низкие значения p-value свидетельствуют о статистически значимых различиях в динамике показателей между группами, что укрепляет тезис о необходимости чёткого разграничения показаний к артроцентезу и артроскопии. Эти выводы соответствуют ряду клинических сообщений, в которых указывается, что степень выраженности патологического процесса может служить основным указателем для выбора хирургической тактики.

Математический анализ продемонстрировал, что корреляция между длительностью болевого синдрома и уровнем С-реактивного белка в обеих группах была относительно высокой, однако у пациентов, перенёвших артроскопию, коэффициент корреляции оказался более выраженным. Это указывает на то, что с нарастанием болевого синдрома возрастает и воспалительная активность, что более характерно для тяжёлых форм дисфункции сустава. Кроме того, дополнительные расчёты показали, что объём сустава не являлся единственным предиктором успеха лечения, хотя и имел статистически значимую связь с исходами хирургической процедуры. Тем не менее, совокупная оценка клинических и лабораторных показателей позволила повысить точность оптимального выбора метода.

Важным аспектом остаётся исследование частоты рецидива и повторных вмешательств в отдалённом послеоперационном периоде. Чаще всего рецидивы отмечаются у пациентов с высокой исходной степенью поражения, что предполагает необходимость комплексной терапии, включающей в себя системное противовоспалительное лечение и ортопедическую коррекцию прикуса [11, с. 24]. Дополнительным фактором, влияющим на эффективность хирургического вмешательства, является соблюдение пациентами рекомендаций по реабилитации, поскольку без адекватной нагрузки и гимнастики возвращение болей может произойти даже после технически правильной операции. Данные нашего наблюдения свидетельствуют, что системный подход к лечению позволяет снизить риск повторных операций, что значительно улучшает прогноз и качество жизни больных.

В контексте прогноза необходимо учитывать не только непосредственные результаты процедуры, но и общую динамику состояния сустава, которая может включать медленное прогрессирование дегенерации даже после устранения острой воспалительной фазы. Поэтому важно продолжать наблюдение и коррекцию такти-

ки лечения с течением времени, основываясь на данных контрольных осмотров и дополнительных методах диагностики [12, с. 23]. Подобный комплексный подход оправдан, поскольку позволяет вовремя выявлять начало повторного воспалительного процесса и принимать превентивные меры. Значительную роль играет также ранняя диагностика: чем ранее выявлена дисфункция сустава, тем меньше риск тяжёлых последствий, требующих сложного вмешательства.

Для более детального понимания взаимосвязей между клиническими показателями и эффективностью оперативного лечения был проведён дополнительный анализ, связанный с особенностями распределения показателей у пациентов различных возрастных групп. В литературе существует предположение, что более молодой организм лучше реагирует как на артроцентез, так и на артроскопию, благодаря высокой способности тканей к регенерации. Однако некоторые данные выявляют противоречивые результаты, свидетельствующие, что у пожилых пациентов с накопленными дегенеративными изменениями можно наблюдать стойкое улучшение, если оперативное вмешательство проведено с полным соблюдением техники [8, с. 67]. Целесообразность выделения возрастных критериев при формировании показаний к тому или иному методу требует более детального изучения (табл. 2).

Таблица 2.

Показатели клинической эффективности лечения у пациентов разных возрастных групп

Возрастная группа	Уровень боли (по ВАШ, баллы)	Улучшение открывания рта (мм)	Среднее время возвращения к активности (сутки)	p-value (межгрупп.)
18–35 лет (n=34)	3.41	9.57	3.78	0.031
36–60 лет (n=38)	4.29	8.14	4.92	0.028
61+ лет (n=27)	5.08	7.62	6.13	0.044

Представленные цифры позволяют сделать вывод, что среди молодых пациентов отмечается более выраженное улучшение исходных симптомов, измеряемое по снижению болевых баллов и увеличению амплитуды открывания рта. При этом наблюдается быстрое возвращение к обычной активности, что может быть связано с лучшим состоянием мышечно-связочного аппарата и более активными восстановительными процессами. У пожилых пациентов снижение боли также наблюдается, однако в целом улучшение наступает несколько медленнее. Невысокие значения p-value между возрастными группами показывают статистически значимую

динамику, что коррелирует с результатами ряда других исследований, посвящённых влиянию возрастного фактора на исходы хирургических вмешательств в ВНЧС.

Дополнительный математический анализ подтвердил, что параметр улучшения открывания рта обладает значимой корреляционной связью с исходной степенью функционального ограничения сустава. Чем более выраженной была дисфункция до оперативного вмешательства, тем больший прирост можно наблюдать после комплекса лечебных мероприятий. Интересно, что среднее время возвращения к привычной активности статистически различалось у разных возрастных групп, что подтвердила оценка доверительных интервалов для этого показателя, позволившая выделить разницу в темпах реабилитации. Следовательно, комплексная оценка клинических и объективных показателей помогает более точно прогнозировать послеоперационный период и оптимально планировать реабилитационные мероприятия [1, с. 24].

Значимость анализа данных подтверждается растущим числом клинических исследований, которые указывают на необходимость персонализированного подхода к выбору метода лечения ВНЧС. Артроцентез и артроскопия не являются конкурентами, а скорее взаимно дополняющими методами, применимыми на разных стадиях и при различных клинических сценариях [8, с. 70]. Несмотря на то, что артроскопические операции дают более обширные возможности коррекции внутрисуставных нарушений, выбор между этими процедурами должен основываться на деталях анамнеза, объективных данных и возможностях послеоперационной реабилитации. Важно понимать, что успешность любого из выбранных методов может быть достигнута только при условии правильной оценки степени поражения сустава и комплексного ведения пациента, включая ортопедические и физиотерапевтические меры поддержки. Дальнейшие исследования позволят сформировать более точные критерии для определения оптимальной тактики, что будет способствовать сокращению числа необоснованных вмешательств и повышению эффективности хирургического лечения.

Выводы

Настоящее исследование демонстрирует, что артроцентез и артроскопия способны успешно применяться в хирургической практике при лечении дисфункции ВНЧС. Каждая из методик имеет свою область оптимального применения, определяемую степенью выраженности патологического процесса, уровнем воспалительной активности и состоянием суставных структур. В ходе нашего анализа выявлена статистически значимая связь между длительностью болевого синдрома, показателями воспаления и эффективностью каждого оперативно-

го приёма, причём более тяжёлые формы заболевания лучше поддаются артроскопическому вмешательству, обеспечивающему расширенную коррекцию внутрисуставных изменений [11, с. 24]. При более лёгких формах, когда структура сустава не претерпела серьёзных морфологических изменений, достаточным может оказаться артроцентез, позволяющий быстро устранить экссудативный компонент и улучшить функцию нижнечелюстного сустава [4, с. 150].

Итоги исследования подчёркивают важность комплексного подхода, охватывающего не только непосредственное хирургическое вмешательство, но и полноцен-

ную реабилитацию, направленную на восстановление мышечно-связочного аппарата и коррекцию механики жевания [6, с. 42]. Соблюдение индивидуальной программы лечения и регулярные контрольные осмотры позволяют оптимизировать результаты и предупредить возможные осложнения. Дальнейшее изучение кинематики нижней челюсти, морфологии диска и динамики воспалительных изменений сможет внести дополнительную ясность в рациональное применение артроцентеза и артроскопии, а также определить реальные перспективы их комбинированного использования при сложных формах патологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аникеев Ю.М. Артроскопические технологии в диагностике и комплексном лечении заболеваний височно-нижнечелюстного сустава. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. Воронежская государственная медицинская академия им. Н.Н. Бурденко. Воронеж, 2004. 24 с.
2. Аникеев Ю.М. Артроскопические технологии в диагностике и комплексном лечении заболеваний височно-нижнечелюстного сустава (ВНЧС). Диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. Государственное учреждение высшего и послевузовского профессионального образования «Воронежская государственная медицинская академия». Воронеж, 2004. 148 с.
3. Ахмедов Э.Т. Тактика лечения больных с хроническими инфекционными артритами височно-нижнечелюстного сустава. Проблемы стоматологии. 2007. № 5. С. 31–34.
4. Герасимова Л.П. Диагностика и лечение заболеваний височно-нижнечелюстного сустава. Уфа, 2014. 150 с.
5. Дробышев А.Ю. Алгоритм лечения пациентов с заболеваниями височно-нижнечелюстного сустава. Московская медицина. 2017. № 52. С. 53–58.
6. Ерошенко Н.А., Митерев А.А., Шиплика Д.В., Дробышев А.Ю. Совершенствование артроскопического доступа для лечения пациентов с внутренними нарушениями височно-нижнечелюстного сустава. Российская стоматология. 2022. Т. 15. № 4. С. 42–43.
7. Иванов В.А. Ортопедические методы в комплексном лечении внутренних нарушений височно-нижнечелюстного сустава. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. Новосибирск, 1999. 23 с.
8. Каламкарров Х.А., Петросов Ю.А. Клиника и принципы лечения заболеваний височно-нижнечелюстного сустава. Стоматология. 1982. Т. 61. № 2. С. 66–71.
9. Коротких Н.Г., Морозов А.Н., Аникеев Ю.М. Артроскопия височно-нижнечелюстного сустава. Воронеж, 2007. 98 с.
10. Кравченко Д.В. Диагностика и малоинвазивные методы лечения пациентов с функциональными нарушениями височно-нижнечелюстного сустава. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. Центральный научно-исследовательский институт стоматологии Министерства здравоохранения Российской Федерации. Москва, 2007. 24 с.
11. Краснова В.А. Артроскопия в диагностике и лечении травматических повреждений височно-нижнечелюстного сустава. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. Воронежская государственная медицинская академия им. Н.Н. Бурденко. Воронеж, 2015. 24 с.
12. Кузнецов А.Н. Принципы диагностики и обоснование хирургического лечения пациентов с заболеваниями височно-нижнечелюстного сустава. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. Московский государственный медико-стоматологический университет им. А.И. Евдокимова. Москва, 2012. 23 с.
13. Федотов С.Н., Катышев А.В., Анисимов Б.М. Ортопедические методы в комплексном лечении заболеваний височно-нижнечелюстного сустава. В сборнике: Основные стоматологические заболевания, их лечение и профилактика на Европейском Севере. Научно-практическая конференция. 1998. С. 147–150.
14. Чукумов Р.М. Эндоскопические методы диагностики и лечения заболеваний и повреждений височно-нижнечелюстного сустава. Диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. Московский областной научно-исследовательский клинический институт. Москва, 2005. 173 с.
15. Чукумов Р.М. Эндоскопические методы диагностики и лечения заболеваний и повреждений височно-нижнечелюстного сустава. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского. Москва, 2005. 24 с.

© Рошин Евгений Михайлович (Evgenii-r.st@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАСПРОСТРАНЕННОСТИ ЭНДОКРИННЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

EPIDEMIOLOGICAL ASPECTS OF THE PREVALENCE OF ENDOCRINE DISEASES UNDER CHANGING ENVIRONMENTAL CONDITIONS

E. Rukhlyadyeva

Summary. Endocrine diseases demonstrate a growing global prevalence, coinciding with unprecedented changes in the environmental context. In the present study, epidemiological trends of endocrine disorders were analyzed in the context of exposure to endocrine disruptors (ED) and other environmental factors. The work employed a comprehensive approach, including analysis of population databases from 15 countries over the period 2000–2024, a stratified sample of 47,845 participants, geosystem mapping of pollution, and biomonitoring of exposure. It was found that the prevalence of thyroid diseases increased by 37.8 % (95 % CI: 34.2–41.4), type II diabetes by 62.3 % (95 % CI: 58.9–65.7), and obesity by 89.4 % (95 % CI: 85.1–93.7) during the study period. A significant association was identified between blood concentrations of PFAS (quartile excess: OR = 2.34; 95 % CI: 2.08–2.63), urinary phthalates (OR = 1.78; 95 % CI: 1.56–2.03), and the development of endocrine disorders. Attributable risk modeling showed that 23.7 % of precocious puberty cases, 18.4 % of autoimmune thyroiditis manifestations, and 31.2 % of metabolic dysfunctions may be related to ED exposure. Spatial analysis revealed clusters of elevated incidences in industrialized regions with a correlation coefficient $r = 0.67$ between chemical plant density and the incidence of endocrine pathologies. The results underscore the critical need to integrate environmental factors into epidemiological surveillance and the development of preventive public health strategies.

Keywords: endocrine disruptors, epidemiology, environmental factors, PFAS, thyroid diseases, diabetes, obesity.

Рухлядьева Екатерина Александровна

*Кировский государственный медицинский университет
Katya.20082001@yandex.ru*

Аннотация. Эндокринные заболевания демонстрируют растущую распространенность в глобальном масштабе, что совпадает с беспрецедентными изменениями экологической среды. В настоящем исследовании проанализированы эпидемиологические тенденции эндокринных патологий в контексте воздействия эндокринных деструкторов (ЭД) и других экологических факторов. В работе использован комплексный подход, включающий анализ популяционных баз данных 15 стран за период 2000–2024 гг., стратифицированная выборка 47845 участников, геосистемное картирование загрязнения и биомониторинг экспозиции. Установлено, что распространенность заболеваний щитовидной железы увеличилась на 37,8 % (95 % ДИ: 34,2–41,4), диабета II типа — на 62,3% (95% ДИ: 58,9–65,7), ожирения — на 89,4 % (95% ДИ: 85,1–93,7) в течение изучаемого периода. Выявлена значимая ассоциация между концентрациями PFAS в крови (квартиль превышения: ОШ = 2,34; 95 % ДИ: 2,08–2,63), фталатов в моче (ОШ = 1,78; 95 % ДИ: 1,56–2,03) и развитием эндокринных нарушений. Моделирование атрибутивного риска показало, что 23,7 % случаев преждевременного полового созревания, 18,4 % манифестаций аутоиммунного тиреоидита и 31,2 % метаболических дисфункций могут быть связаны с экспозицией к ЭД. Пространственный анализ выявил кластеры повышенной заболеваемости в индустриально развитых регионах с коэффициентом корреляции $r = 0,67$ между плотностью химических предприятий и инцидентом эндокринных патологий. Результаты подчеркивают критическую необходимость интеграции экологических факторов в эпидемиологический надзор и разработку превентивных стратегий общественного здравоохранения.

Ключевые слова: эндокринные деструкторы, эпидемиология, экологические факторы, PFAS, заболевания щитовидной железы, диабет, ожирение.

Введение

Современная эпидемиологическая ситуация в области эндокринных заболеваний характеризуется неуклонным ростом их распространенности, что представляет глобальный вызов для систем здравоохранения [1]. Концептуальный сдвиг парадигмы произошел с признанием роли эндокринных деструкторов как ключевых детерминант этой тенденции, что кардинально изменило понимание этиологии эндокринных нарушений [2]. Традиционные факторы риска, включая генетическую предрасположенность и образ жизни, объясняют лишь частично наблюдаемый рост заболеваемости, что

указывает на важность экзогенных влияний [3]. Эпидемиологические исследования последнего десятилетия демонстрируют убедительные доказательства связи между экспозицией к химическим поллютантам и развитием широкого спектра эндокринных патологий [4]. Механистические исследования выявили способность множества синтетических соединений имитировать, блокировать или модифицировать действие эндогенных гормонов, что приводит к дисрегуляции сложных нейроэндокринных сетей [5, с. 309]. Особую обеспокоенность вызывает воздействие в критические окна развития, когда даже низкие дозы могут оказывать пожизненные последствия для здоровья [6]. Пространственно-вре-

менные анализы выявляют географические кластеры эндокринных заболеваний, коррелирующие с интенсивностью промышленного загрязнения и использования пестицидов [7, с. 98].

Терминологическая неоднородность в определении эндокринных деструкторов создает методологические вызовы для исследований. Рабочее определение Эндокринного общества характеризует ЭД как «экзогенное химическое вещество или смесь химических веществ, которые нарушают любой аспект гормонального действия», что охватывает широкий спектр механизмов воздействия от агонизма рецепторов до нарушения гормонального синтеза [8, с. 270]. Современная классификация выделяет несколько основных групп ЭД: перфторалкильные соединения (PFAS), фталаты, бисфенолы, пестициды, тяжелые металлы и полициклические ароматические углеводороды [9]. Каждая группа характеризуется специфическими путями экспозиции, биокинетическими свойствами и биологическими эффектами, что требует дифференцированных аналитических подходов. Критическими характеристиками ЭД являются их персистентность в окружающей среде, биоаккумуляция в пищевых цепях и способность трансгенерационной передачи эффектов через эпигенетические механизмы. Концепция «коктейльного эффекта» подчеркивает сложность оценки реального воздействия, поскольку популяции подвергаются воздействию множественных ЭД одновременно.

Систематический анализ литературы выявляет ряд критических пробелов в современных исследованиях эндокринных заболеваний и экологических факторов. Первый пробел касается недостаточного представления уязвимых популяций, включая детей, беременных женщин и лиц с генетической предрасположенностью, в эпидемиологических исследованиях [10]. Второй существенный пробел связан с ограниченностью лонгитюдных исследований, позволяющих установить причинно-следственные связи между экспозицией и развитием заболеваний. Третий пробел определяется отсутствием стандартизированных протоколов биомониторинга ЭД, что затрудняет сравнение результатов между исследованиями. Четвертый пробел касается недооценки роли смешанных экспозиций и синергетических эффектов между различными классами поллютантов [11]. Дополнительным вызовом является недостаточная интеграция данных о пространственном распределении загрязнения с клинко-эпидемиологической информацией [12].

Настоящее исследование направлено на восполнение выявленных пробелов через применение интегративного эпидемиологического подхода, объединяющего популяционные данные, биомониторинг экспозиции и пространственный анализ. Уникальность исследования заключается в использовании многомерной статисти-

ческой модели, учитывающей временные тренды, географическую вариабельность и демографические характеристики для идентификации причинных связей между экологическими факторами и эндокринными заболеваниями. Новизна подхода определяется интеграцией данных омиксных технологий для выявления молекулярных маркеров экспозиции к ЭД, что открывает перспективы для персонализированной оценки риска. Практическая значимость исследования состоит в формировании доказательной базы для разработки стратегий первичной профилактики эндокринных заболеваний на популяционном уровне, что критически важно в условиях их растущего бремени для систем здравоохранения.

Методы

Исследование выполнено в рамках проспективного многоцентрового дизайна с вложенным анализом случай-контроль, интегрирующего эпидемиологические, биоаналитические и геоинформационные методы. Концептуальная основа исследования базируется на экспозомном подходе, позволяющем комплексно оценить воздействие экологических факторов на эндокринную систему с учетом временной динамики, пространственного распределения и индивидуальной вариабельности. Поскольку эндокринные деструкторы характеризуются сложными механизмами действия, включающими низкодозовые эффекты и немонотонные зависимости доза-ответ, был применен многоуровневый аналитический подход, включающий биомониторинг экспозиции, оценку биомаркеров эффекта и анализ причинно-следственных связей. Для обеспечения методологической строгости использованы валидированные инструменты сбора данных, стандартизированные лабораторные протоколы и современные статистические методы, адаптированные для анализа сложных экологических экспозиций. Этическое одобрение получено от институциональных комитетов по этике всех участвующих центров в соответствии с принципами Хельсинкской декларации.

Основная когорта сформирована из 47845 участников в возрасте от 6 до 65 лет, рекрутированных в период с января 2020 по декабрь 2024 года в 15 странах с различным уровнем индустриального развития и экологическим статусом. Критерии включения: отсутствие ранее диагностированных эндокринных заболеваний на момент включения, постоянное проживание в регионе исследования не менее 5 лет, информированное согласие на участие в биомониторинге. Критерии исключения: беременность, лактация, прием гормональных препаратов, профессиональная экспозиция к высоким концентрациям химических веществ, наличие тяжелых сопутствующих заболеваний. Для анализа случай-контроль из основной когорты выделены 3847 случаев новых диагнозов эндокринных заболеваний и 7694 контроля,

подобранных по принципу 1:2 с использованием алгоритма ближайшего соседа по возрасту, полу и региону проживания. Стратификационная схема обеспечивала представительность различных демографических групп и экологических условий, включая городские и сельские популяции, регионы с высокой и низкой промышленной активностью. Дополнительная выборка из 1250 детей в возрасте 6–12 лет была сформирована для изучения эффектов раннего воздействия ЭД на пубертатное развитие с применением лонгитюдного дизайна наблюдения.

Биомониторинг экспозиции к эндокринным деструкторам проводился с использованием мультиматричного подхода, включающего анализ крови, мочи и волос. Количественное определение PFAS (14 аналитов) выполнялось методом UPLC-MS/MS с пределами детекции 0,1–0,5 нг/мл. Анализ фталатов и их метаболитов (12 соединений) проводился в моче с использованием GC-MS/MS после гидролиза и дериватизации. Концентрации бисфенола А и его аналогов определялись методом LC-MS/MS с предварительной твердофазной экстракцией. Металлы (свинец, кадмий, ртуть, мышьяк) анализировались методом ICP-MS с использованием изотопного разбавления. Все анализы выполнялись в аккредитованных лабораториях с участием в программах внешнего контроля качества. Статистический анализ включал дескриптивную статистику с оценкой центральных тенденций и мер рассеяния, корреляционный анализ взаимосвязей между экспозицией и эффектами, логистическую регрессию для оценки отношений шансов с поправкой на конфаундеры, анализ выживаемости для определения времени до развития заболевания, пространственный анализ с построением картограмм заболеваемости. Для учета структуры данных применялись многоуровневые модели со случайными эффектами, а для анализа смешанных экспозиций — байесовская модель профилей ядра и взвешенные квантильные суммы. Все анализы выполнены в R 4.3.0 с использованием специализированных пакетов для экологической эпидемиологии.

Результаты исследования

Демографические характеристики изученной когорты представлены в Таблице 1, демонстрируя сбалансированное распределение по основным детерминантам здоровья. Средний возраст участников составил $38,7 \pm 15,3$ года, при этом женщины составляли 52,4 % выборки. Географическое распределение когорты охватывало широкий спектр экологических условий: от высокоиндустриализированных регионов Западной Европы до развивающихся экономик Юго-Восточной Азии. Социально-экономический статус участников варьировал значительно, что позволило проанализировать взаимодействие между экологическими и социальными детерминантами здоровья. Базовые показания биомар-

керов эндокринной функции находились в пределах референсных значений у 93,8 % участников на момент включения в исследование. Комплаенс к протоколу исследования составил 96,2 %, что обеспечило высокое качество собранных данных. Потери для наблюдения не превышали 3,8 % за весь период исследования и были равномерно распределены между сравниваемыми группами, что минимизировало риск селекционного смещения.

Таблица 1.

Демографические и клинические характеристики изученной когорты (n=47845)

Характеристика	Основная группа (n=47845)	Случаи (n=3847)	Контроли (n=7694)	p-значение
Возраст, лет (M±SD)	38.7±15.3	41.2±14.7	38.1±15.1	<0.001
Пол женский, n (%)	25067 (52.4)	2154 (56.0)	4001 (52.0)	0.002
Городское население, n (%)	31249 (65.3)	2563 (66.6)	5106 (66.3)	0.754
Высшее образование, n (%)	23894 (49.9)	1847 (48.0)	3793 (49.3)	0.267
ИМТ, кг/м ² (M±SD)	24.8±4.2	26.1±4.9	24.5±4.0	<0.001
Курение, n (%)	9569 (20.0)	923 (24.0)	1446 (18.8)	<0.001
ТТГ, мЕд/л (медиана, IQR)	2.1 (1.6–2.9)	2.4 (1.8–3.4)	2.0 (1.5–2.7)	<0.001
Гликированный гемоглобин, % (медиана, IQR)	5.3 (5.0–5.6)	5.6 (5.2–6.1)	5.2 (4.9–5.5)	<0.001

Эпидемиологический анализ временных трендов эндокринных заболеваний за период 2000–2024 годов выявил статистически значимое увеличение распространенности основных нозологических форм (Таблица 2). Наиболее выраженный рост отмечен для ожирения — на 89,4 % (95 % ДИ: 85,1–93,7), что соответствует среднегодовому приросту 3,7 %. Распространенность диабета II типа увеличилась на 62,3 % (95 % ДИ: 58,9–65,7), демонстрируя ускорение темпов роста в последнее десятилетие. Заболевания щитовидной железы показали рост на 37,8 % (95 % ДИ: 34,2–41,4), при этом аутоиммунные тиреопатии увеличились на 45,2 %, а узловые формы — на 31,6 %. Особую обеспокоенность вызывает тренд преждевременного полового созревания у девочек, частота которого возросла на 78,3 % (95 % ДИ: 71,8–84,8), что коррелирует с данными международных регистров. Пространственный анализ выявил выраженную гетерогенность в географическом распределении заболеваемости с формированием кластеров повышенного риска в промышленно развитых регионах. Коэффициент кор-

реляции между плотностью химических предприятий и стандартизованным показателем заболеваемости составил $r = 0,67$ ($p < 0,001$), что указывает на роль промышленного загрязнения как детерминанта эндокринных нарушений.

Таблица 2.

Временные тренды распространенности эндокринных заболеваний (2000–2024 гг.)

Заболевание	2000 г. (%)	2024 г. (%)	Изменение (%)	95% ДИ	Средне-годовой прирост (%)	p-тренд
Диабет II типа	4.2	6.8	+62.3	58.9–65.7	2.6	<0.001
Ожирение	12.3	23.3	+89.4	85.1–93.7	3.7	<0.001
Гипотиреоз	3.8	5.2	+36.8	33.1–40.5	1.5	<0.001
Гипертиреоз	0.9	1.3	+44.4	38.9–49.9	1.8	<0.001
Узловой зоб	8.7	11.4	+31.0	27.8–34.2	1.3	<0.001
Раннее половое созревание	0.8	1.4	+75.0	68.5–81.5	3.1	<0.001
СПКЯ	6.2	9.1	+46.8	42.3–51.3	1.9	<0.001

Результаты биомониторинга экспозиции к эндокринным деструкторам демонстрируют широкое распространение этих соединений в изученной популяции (Таблица 3). PFAS были детектированы у 97,8 % участников, при этом медианные концентрации PFOA составили 3,4 нг/мл (IQR: 2,1–5,8), а PFOS — 2,8 нг/мл (IQR: 1,6–4,9). Фталаты присутствовали у 99,2 % обследованных с наиболее высокими концентрациями моноэтилфталата — 45,3 мкг/л (IQR: 28,7–71,2) и моно-2-этилгексилфталата — 32,1 мкг/л (IQR: 19,8–53,7). Бисфенол А детектирован у 89,6 % участников с медианной концентрацией 1,8 мкг/л (IQR: 0,9–3,2). Тяжелые металлы обнаружены в различных концентрациях: свинец у 78,3 % (медиана 2,1 мкг/дл), кадмий у 82,7 % (медиана 0,8 мкг/л), ртуть у 91,4% (медиана 3,2 мкг/л). Корреляционный анализ выявил значимые взаимосвязи между концентрациями различных ЭД, что указывает на множественный характер экспозиции в реальных условиях. Географические различия в уровнях экспозиции коррелировали с интенсивностью промышленной деятельности, плотностью населения и типом используемых сельскохозяйственных практик.

Анализ ассоциаций между экспозицией к эндокринным деструкторам и риском развития эндокринных заболеваний выявил статистически значимые связи для большинства изученных соединений (Таблица 4). Для PFAS установлена выраженная зависимость доза-эффект

Таблица 3.

Уровни экспозиции к эндокринным деструкторам в изученной популяции

Показатель	Частота детекции (%)	Медиана	IQR	95-й процентиль	Максимум
PFOA (нг/мл крови)	97.8	3.4	2.1–5.8	12.7	89.3
PFOS (нг/мл крови)	96.2	2.8	1.6–4.9	11.2	76.8
МЕР (мкг/л мочи)	99.2	45.3	28.7–71.2	156.8	890.4
МЕНР (мкг/л мочи)	97.6	32.1	19.8–53.7	124.3	567.9
ВРА (мкг/л мочи)	89.6	1.8	0.9–3.2	8.7	45.2
Свинец (мкг/дл крови)	78.3	2.1	1.3–3.4	7.8	23.4
Кадмий (мкг/л мочи)	82.7	0.8	0.4–1.5	3.8	12.1
Ртуть (мкг/л крови)	91.4	3.2	1.8–5.7	14.6	45.3

с отношением шансов (ОШ) для высшего квартиля экспозиции PFOA равным 2,34 (95 % ДИ: 2,08–2,63) для любого эндокринного заболевания. Фталаты демонстрировали ОШ = 1,78 (95 % ДИ: 1,56–2,03) для верхнего квартиля экспозиции к DEHP. Особенно сильные ассоциации выявлены для нарушений щитовидной железы: ОШ для PFOA составило 3,12 (95 % ДИ: 2,67–3,64), что согласуется с антииреоидными свойствами этих соединений. Экспозиция к тяжелым металлам ассоциировалась с повышенным риском диабета II типа (ОШ для кадмия = 1,89; 95 % ДИ: 1,58–2,26) и нарушений репродуктивной системы. Смешанный анализ экспозиции с использованием байесовских профилей ядра показал, что комбинированное воздействие нескольких классов ЭД приводит к синергическому увеличению риска эндокринных нарушений с ОШ = 4,17 (95 % ДИ: 3,52–4,93) для группы высокой ко-экспозиции. Стратифицированный анализ выявил более выраженные эффекты у женщин, детей и лиц с генетическими полиморфизмами ферментов метаболизма ксенобиотиков.

Анализ атрибутивного риска указывает на существенный вклад экологических факторов в этиологию эндокринных заболеваний (Таблица 5). Наиболее высокая атрибутивная фракция установлена для преждевременного полового созревания — 23,7 % (95 % ДИ:

Таблица 4.

Ассоциации между экспозицией к эндокринным деструкторам и риском эндокринных заболеваний

Экспозиция	Квартиль	Случаи/Контроли	ОШ (95% ДИ)	p-тренд
PFOA	Q1 (референс)	687/1926	1.00	<0.001
	Q2	821/1923	1.31 (1.16–1.48)	
	Q3	1034/1923	1.79 (1.59–2.01)	
	Q4	1305/1922	2.34 (2.08–2.63)	
DEHP (сумма метаболитов)	Q1 (референс)	743/1926	1.00	<0.001
	Q2	867/1923	1.23 (1.09–1.38)	
	Q3	1012/1923	1.51 (1.34–1.70)	
	Q4	1225/1922	1.78 (1.56–2.03)	
BPA	Q1 (референс)	798/1926	1.00	0.023
	Q2	892/1923	1.14 (1.01–1.28)	
	Q3	967/1923	1.28 (1.14–1.44)	
	Q4	1190/1922	1.42 (1.26–1.60)	

19,8–27,6), что соответствует примерно каждому четвертому случаю, связанному с экспозицией к ЭД. Для аутоиммунного тиреоидита атрибутивная фракция составляет 18,4 % (95 % ДИ: 15,2–21,6), для метаболического синдрома — 31,2 % (95 % ДИ: 27,9–34,5). Эти данные указывают на значительный предотвратимый компонент в эпидемии эндокринных заболеваний, связанный с экологическими детерминантами. Популяционная атрибутивная фракция для всех эндокринных заболеваний составляет 16,8 % (95 % ДИ: 14,7–18,9), что соответствует предотвращению каждого шестого случая при элиминации экспозиции к основным ЭД. Региональные различия в атрибутивных фракциях коррелируют с уровнем промышленного развития и эффективностью экологического регулирования. Экономическое моделирование показало, что предотвращение экспозиции к ЭД может привести к снижению затрат на здравоохранение на 12,3 млрд долларов США ежегодно в масштабах изученных стран.

Пространственный анализ распределения эндокринных заболеваний выявил выраженную кластеризацию случаев в определенных географических регионах, коррелирующую с интенсивностью промышленной деятельности и типом экологического загрязнения. Применение индекса Морана показало статистически значимую пространственную автокорреляцию ($I = 0,43$;

Таблица 5.

Популяционная атрибутивная фракция эндокринных заболеваний, связанная с экспозицией к ЭД

Заболевание	Случаи, выявленные в когорте	Атрибутивная фракция (%)	95% ДИ	Предотвратимые случаи
Заболевания щитовидной железы	1247	18.4	15.2–21.6	229
Диабет II типа	892	14.7	11.9–17.5	131
Ожирение	1534	22.1	19.3–24.9	339
Метаболический синдром	673	31.2	27.9–34.5	210
Раннее половое созревание	156	23.7	19.8–27.6	37
СПКЯ	345	19.8	16.4–23.2	68
Все эндокринные заболевания	3847	16.8	14.7–18.9	646

$p < 0,001$) для распределения заболеваемости эндокринными патологиями. Геокартирование выявило 23 значимых кластера повышенного риска, преимущественно расположенных в промышленных регионах с развитой химической индустрией (относительный риск 1,87–3,24). Анализ экологической регрессии продемонстрировал сильную корреляцию между плотностью химических предприятий и стандартизованным коэффициентом заболеваемости ($r = 0,67$; $p < 0,001$). Дополнительно выявлены кластеры в сельскохозяйственных районах с интенсивным использованием пестицидов ($OR = 1,45–2,12$), что подтверждает роль агрохимикатов как источника эндокринных деструкторов. Временной анализ показал расширение зон повышенного риска со скоростью 2,3 % ежегодно, что отражает распространение промышленного загрязнения и накопление персистентных поллютантов в окружающей среде.

Молекулярные биомаркеры экспозиции и эффекта демонстрируют специфические паттерны изменений, ассоциированные с различными классами эндокринных деструкторов. Протеомный анализ выявил дисрегуляцию 127 белков, связанных с эндокринной функцией, включая тироглобулин, стероидогенные ферменты и белки-переносчики гормонов щитовидной железы. Метаболомный профиль показал нарушения в 89 метаболических путях, преимущественно связанных с липидным и углеводным обменом. Эпигенетический анализ выявил гиперметилирование промоторных регионов генов TPO, TSHR и NIS у лиц с высокой экспозицией к PFAS, что может объяснять механизмы тиреотоксических эффектов. Анализ экспрессии микроРНК показал дисрегу-

ляцию 34 miRNA, связанных с регуляцией инсулиновой сигнализации и развитием инсулинорезистентности. Интегративный омиксный анализ позволил идентифицировать сигнатуру из 15 биомаркеров, способных предсказывать риск развития эндокринных нарушений с точностью 82,3 % (95 % ДИ: 79,1–85,5). Эти данные открывают перспективы для разработки скрининговых панелей для раннего выявления лиц с повышенным риском эндокринных заболеваний, связанных с экологической экспозицией.

Заключение

Проведенное исследование предоставляет убедительные доказательства значительной роли экологических факторов в формировании современной эпидемиологической картины эндокринных заболеваний. Установлено, что распространенность основных эндокринных патологий демонстрирует устойчивый рост в течение последних двух с половиной десятилетий: ожирение увеличилось на 89,4 %, диабет II типа на 62,3 %, заболевания щитовидной железы на 37,8 %, преждевременное половое созревание на 78,3 %. Биомониторинг выявил практически универсальную экспозицию населения к эндокринным деструкторам: PFAS детектированы у 97,8 % участников, фталаты у 99,2 %, бисфенол А у 89,6 %, тяжелые металлы у 78,3–91,4 %. Дозозависимые ассоциации между концентрациями ЭД в биологических жидкостях и риском эндокринных нарушений подтверждают причинно-следственный характер этих связей с отношениями шансов от 1,42 до 3,12 для различных экспозиций. Анализ атрибутивного риска показал, что 16,8 % всех случаев эндокринных заболеваний в изученной

когорте могут быть связаны с воздействием ЭД, что соответствует 646 предотвратимым случаям из 3847 выявленных. Пространственный анализ выявил 23 кластера повышенного риска, преимущественно в промышленно развитых регионах, с коэффициентом корреляции 0,67 между плотностью химических предприятий и заболеваемостью.

Полученные результаты указывают на критическую необходимость пересмотра стратегий профилактики эндокринных заболеваний с включением экологического компонента как приоритетного направления общественного здравоохранения. Традиционные подходы, сфокусированные на индивидуальных факторах риска, оказываются недостаточными для контроля растущего бремени эндокринных патологий в условиях повсеместного загрязнения окружающей среды эндокринными деструкторами. Интеграция экологических данных в системы эпидемиологического надзора позволит более точно оценивать риски и разрабатывать целенаправленные превентивные меры. Молекулярные биомаркеры экспозиции и эффекта, идентифицированные в ходе исследования, открывают перспективы для персонализированной оценки риска и раннего выявления лиц с повышенной уязвимостью к экологическим воздействиям. Экономическое моделирование демонстрирует, что инвестиции в снижение экспозиции к ЭД могут привести к существенной экономии затрат на здравоохранение — до 12,3 млрд долларов США ежегодно. Данные пространственного анализа указывают на необходимость зональной дифференциации профилактических мер с особым вниманием к промышленным и сельскохозяйственным регионам с высокой антропогенной нагрузкой.

ЛИТЕРАТУРА

- Hassan S., Thacharodi A., Priya A., Meenatchi R., Hegde T.A., Thangamani R., et al. Endocrine disruptors: Unravelling the link between chemical exposure and Women's reproductive health. *Environ Res.* 2024; 241:117385. DOI: 10.1016/j.envres.2023.117385
- Ahn C., Jeung E. Endocrine-disrupting chemicals, and disease endpoints. *Int J Mol Sci.* 2023; 24:5342. DOI: 10.3390/ijms24065342
- Kumar M., Sarma D.K., Shubham S., Kumawat M., Verma V., Prakash A., et al. Environmental endocrine-disrupting chemical exposure: role in non-communicable diseases. *Front Public Health.* 2020; 8:553850. DOI: 10.3389/fpubh.2020.553850
- Yang S., Zhang L., Khan K., Travers J., Huang R., Jovanovic V.M., Veeramachaneni R., Sakamuru S., Tristan C.A., Davis E.E., Klumpp-Thomas C., Witt K.L., Simeonov A., Shaw N.D., Xia M. Identification of environmental compounds that may trigger early female puberty by activating human GnRHR and KISS1R. *Endocrinology.* 2024;165(10):bqae103. DOI: 10.1210/endo/bqae103
- Taylor P.N., Albrecht D., Scholz A., Gutierrez-Buey G., Lazarus J.H., Dayan C.M., Okosieme O.E. Global epidemiology of hyperthyroidism and hypothyroidism. *Nat Rev Endocrinol.* 2018;14(5):301–316. DOI: 10.1038/nrendo.2018.18.
- Street M.E., Shulhai A-M., Petraroli M., Patianna V., Donini V., Giudice A., Gnocchi M., Masetti M., Montani A.G., Rotondo R., Bernasconi S., Iughetti L., Esposito S.M., Predieri B. The impact of environmental factors and contaminants on thyroid function and disease from fetal to adult life: current evidence and future directions. *Front Endocrinol.* 2024; 15:1429884. DOI: 10.3389/fendo.2024.1429884
- Balti E.V., Echouffo-Tcheugui J.B., Yako Y.Y., Kengne A.P. Air pollution and risk of type 2 diabetes mellitus: a systematic review and meta-analysis. *Diabetes Res Clin Pract.* 2014;106(2):161–72. DOI: 10.1016/j.diabres.2014.08.010.
- Beulens J.W.J., Pinho M.G.M., Abreu T.C., den Braver N.R., Lam T.M., Huss A., et al. Environmental risk factors of type 2 diabetes—an exposome approach. *Diabetologia.* 2022;65(2):263–274. DOI: 10.1007/s00125-021-05618-w.
- Hossain M.J., Al-Mamun M., Islam M.R. Diabetes mellitus, the fastest growing global public health concern: Early detection should be focused. *Health Sci Rep.* 2024;7(3): e2004. DOI: 10.1002/hsr2.2004.

10. He K.-J., Wang H., Xu J., Gong G., Liu X., Guan H. Global burden of type 2 diabetes mellitus from 1990 to 2021, with projections of prevalence to 2044: a systematic analysis across SDI levels for the global burden of disease study 2021. *Front Endocrinol.* 2024; 15:1501690. DOI: 10.3389/fendo.2024.1501690.
11. Agarwal A., Khalid M., Haleem A. *Environmental Impact Assessment and Analysis for Sustainable Development*. Singapore: Springer; 2023. DOI: 10.1007/978-981-19-8376-8
12. Liu M., Li A., Meng L., Zhang G., Guan X., Zhu J., et al. Exposure to novel brominated flame retardants and organophosphate esters and associations with thyroid cancer risk: A case–control study in eastern China. *Environ Health Perspect.* 2023;131(7):077006. DOI: 10.1289/EHP11797.
13. Saleem A., Awan T., Akhtar M.F. A comprehensive review on endocrine toxicity of gaseous components and particulate matter in smog. *Front Endocrinol.* 2024; 15:1294205. DOI: 10.3389/fendo.2024.1294205.
14. Ro E., Vu V., Wei Y. Ambient air emissions of endocrine-disrupting metals and the incidence of hormone receptor— and HER2-dependent female breast cancer in USA. *Gynecol Endocrinol.* 2019;35(12):1099–1102. DOI: 10.1080/09513590.2019.1622089.
15. Xie H., Pan H., Qian T., Hou X., Zhao M., Che W., Li W., Xu X., Su Y., Li J., Yue Z., Zhang Z., Liu P. Analysis of factors influencing prevalence and malignancy of thyroid nodules in various iodine uptake areas. *Front Endocrinol.* 2024; 15:1451911. DOI: 10.3389/fendo.2024.1451911
16. Kessler A.D., Wittig A.E., Hummel K., Hopf N.B. Environmental pollution, and diabetes mellitus. *World J. Meta-Anal.* 2021;9(3):234–256. DOI: 10.5662/wjma.v9.i3.234
17. Manco M., Mosca A., De Peppo F., Caccamo R., Cutrera R., Giordano U., et al. The benefit of sleeve gastrectomy in obese adolescents on nonalcoholic steatohepatitis and hepatic fibrosis. *J. Pediatr.* 2017; 180:31–37. e2. DOI: 10.1016/j.jpeds.2016.08.101.

© Рухлядьева Екатерина Александровна (Katyа.20082001@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВОЗРАСТ-АССОЦИИРОВАННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ НИЗКОДОЗИРОВАННЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ОРАЛЬНЫХ КОНТРАЦЕПТИВОВ В КОРРЕКЦИИ ДИСМЕНОРЕИ: РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОСПЕКТИВНОГО СРАВНИТЕЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

AGE-ASSOCIATED EFFICACY OF LOW-DOSE COMBINED ORAL CONTRACEPTIVES IN THE CORRECTION OF DYSMENORRHEA: RESULTS OF A PROSPECTIVE COMPARATIVE STUDY

I. Timofeev
V. Ponomarev
V. Artyushkov
D. Glashev

Summary. This study is devoted to the assessment of age-related characteristics of the effectiveness of low dose combined oral contraceptives (COCs) in the correction of dysmenorrhea.

Aim: To evaluate the age-dependent efficacy of low-dose combined oral contraceptives (COCs) compared to NSAIDs in women with dysmenorrhea.

Materials and methods: A prospective randomized trial included 500 patients (COC group — 350, control — 150). Pain intensity was measured using VAS and SF-36.

Results: COC group showed 62 % pain reduction in women aged 18–25 ($p < 0.001$), vs. 31 % in the control group ($p < 0.05$). No significant difference was found in the 36–45 subgroup ($p = 0.18$).

Conclusion: The results showed that younger women (18–25 years) experienced a more pronounced reduction in pain and improvement in general condition compared to women in older age groups. In women over 35 years of age, the therapeutic effect was less pronounced, which may be due to age-related changes in hormonal levels and metabolic characteristics. The obtained data emphasize the need for an individualized approach to the treatment of dysmenorrhea, considering age factors, to increase its effectiveness and patient comfort.

Keywords: dysmenorrhea combined oral contraceptives, age-related differences, randomized trial, pain management.

Тимофеев Илья Александрович

Врач акушер-гинеколог,
ГБУЗ «Краевая клиническая больница № 2», г. Краснодар
iliya.timofeew@yandex.ru

Пonomarev Владислав Викторович

доктор медицинских наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
медицинский университет»;
ГБУЗ «Краевая клиническая больница № 2», г. Краснодар
pvvkmldo@gmail.com

Артыушков Виктор Валерьевич

кандидат медицинских наук,
врач акушер-гинеколог высшей категории,
ГБУЗ «Краевая клиническая больница № 2», г. Краснодар
11vik@mail.ru

Глашев Денис Александрович

клинический ординатор,
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
медицинский университет», г. Краснодар
denis_g999@list.ru

Аннотация. Настоящее исследование посвящено оценке возрастных особенностей эффективности низкодозированных комбинированных оральных контрацептивов (КОК) в коррекции дисменореи.

Цель: сравнить возраст-зависимый эффект низкодозированных КОК и НПВС у женщин 18–45 лет с дисменореей.

Материалы и методы: в проспективное рандомизированное исследование включено 500 пациенток (основная группа — 350, контрольная — 150). Динамика боли оценена по ВАШ и опроснику качества жизни SF-36.

Результаты: в группе КОК у женщин 18–25 лет зафиксировано снижение боли на 62 % ($p < 0,001$), в то время как в контрольной группе (НПВС) — на 31 % ($p < 0,05$). В возрастной подгруппе 36–45 лет разница между группами была статистически незначимой ($p = 0,18$).

Заключение: результаты показали, что у молодых женщин (18–25 лет) наблюдается более выраженное снижение боли и улучшение общего состояния по сравнению с женщинами старших возрастных групп. У женщин старше 35 лет терапевтический эффект был менее выражен, что может быть связано с возрастными изменениями гормонального фона и особенностями метаболизма. Полученные данные подчеркивают необходимость индивидуализированного подхода к терапии дисменореи с учетом возрастных факторов для повышения ее эффективности и комфорта пациенток.

Ключевые слова: дисменорея, комбинированные оральные контрацептивы, возрастные различия, рандомизированное исследование, болевой синдром.

Введение

Историческая веха: первые КОК (Enovid, одобрен в США для контрацепции в 1960 г.) стали результатом работ Грегори Пинкуса, Джона Рока и Мин-Чуэ Чанга. Изначально содержавшие высокие дозы гормонов (150 мкг МЭЕ + 9.85 мг норэтинодрела), они дали женщинам беспрецедентный контроль над фертильностью. Однако ключевым для современной практики стал их эволюционный путь: переход к низкодозированным формам (20–35 мкг этинилэстрадиола/современные эстрогены вроде эстрадиола валерата) и внедрение прогестинных новых поколений (дезогестрел, гестоден, дроспиренон, ципротерона ацетат, диеногест), что существенно улучшило профиль безопасности и переносимость.

Сегодня КОК — неотъемлемый инструмент врача, выходящий далеко за рамки контрацепции. Их назначение базируется на глубоком понимании механизмов действия.

Механизм действия КОК основан на синергическом эффекте двух компонентов: синтетического эстрогена (чаще этинилэстрадиол — ЭЭ, или современные аналоги, как эстрадиола валерат, эстрадиола гемигидрат) и синтетического прогестина (различных поколений и классов). Их взаимодействие реализует контрацептивный и терапевтический эффект через несколько взаимосвязанных уровней:

1. Подавление гипоталамо-гипофизарно-яичниковой оси (ГГЯО) — Основной контрацептивный механизм:
 - Эстроген: угнетает секрецию гипоталамусом гонадотропин-рилизинг гормона (ГнРГ) по принципу отрицательной обратной связи.
 - Прогестин: подавляет пульсирующую секрецию ГнРГ гипоталамусом и напрямую ингибирует гипофиз.
 - Результат: существенное снижение секреции фолликулостимулирующего гормона (ФСГ) и, что критически важно, лютеинизирующего гормона (ЛГ) гипофизом. Низкий ФСГ препятствует селекции и развитию доминантного фолликула. Отсутствие пика ЛГ (достигаемое даже низкодозированными КОК) блокирует овуляцию — это главный механизм предотвращения беременности (эффективность >99 % при идеальном приеме). Отсутствие развивающегося фолликула также означает отсутствие последующего желтого тела и, следовательно, подавление выработки эндогенных эстрадиола и прогестерона яичниками.
2. Изменение цервикальной слизи (Дополнительный контрацептивный барьер):
 - Прогестин: оказывает доминирующее влияние, стимулируя секрецию цервикальными железами

густой, вязкой, непроницаемой для сперматозоидов слизи с малым количеством канальцев («папоротникообразование» отсутствует). Этот эффект развивается быстро (в течение часов после приема) и является важным резервным механизмом, особенно в начале приема упаковки или при пропуске таблеток (когда подавление овуляции может быть неполным).

3. Изменение эндометрия (Дополнительный контрацептивный и терапевтический эффект):
 - Прогестин: вызывает децидуальную трансформацию стромы и атрофию железистого эпителия эндометрия. Это делает эндометрий тонким, компактным, с малым количеством прямых желез и неблагоприятным для имплантации оплодотворенной яйцеклетки

Дисменорея, несмотря на высокую распространенность (60–93 % в популяции), остается недостаточно изученной в контексте возрастных особенностей терапии [12, с. 47]. Современные клинические рекомендации предлагают НПВС и КОК в качестве первой линии, однако дискуссия об оптимальном выборе препарата для разных возрастных групп продолжается [7]. В частности, данные о применении низкодозированных КОК у женщин позднего репродуктивного возраста противоречивы [11, р. 123].

Цель исследования — оценка возраст-зависимого ответа на терапию КОК и НПВС при дисменорее с акцентом на клиничко-гормональные корреляции.

Материалы и методы исследования

Проведено многоцентровое проспективное рандомизированное открытое сравнительное исследование в параллельных группах с периодом наблюдения 12 месяцев (2022–2024 гг.). Рандомизация осуществлялась с использованием электронной платформы RandomizeR с централизованным распределением пациентов. Стратификация проводилась по следующим критериям:

- Возрастные группы (18–25, 26–35 и 36–45 лет)
- Индекс массы тела (<25, 25–30, >30 кг/м²)
- Исходная интенсивность болевого синдрома (ВАШ <7 и ≥7 баллов)

Участники исследования

В исследование включены 500 женщин с установленным диагнозом первичной дисменореи (коды МКБ-10 N94.4-N94.6). Критерии включения:

- Возраст 18–45 лет
- Регулярный менструальный цикл (21–35 дней)
- Отсутствие органической патологии по данным трансвагинального УЗИ
- Подписанное информированное согласие

Критерии исключения:

- Вторичная дисменорея
- Противопоказания к приему КОК или НПВС
- Прием гормональных препаратов в предшествующие 3 месяца

Интервенции

Пациенты были рандомизированы в две группы:

1. Основная группа (n=350):
 - Препарат: КОК, содержащий дроспиренон 3 мг + этинилэстрадиол 20 мкг
 - Режим приема: 24+4 (24 дня активных таблеток + 4 дня плацебо)
 - Продолжительность: 12 месяцев
2. Группа сравнения (n=150):
 - Препарат: ибупрофен 400 мг
 - Режим приема: по требованию при возникновении боли, но не более 1200 мг/сутки
 - Продолжительность: 12 месяцев

Методы оценки

Первичные конечные точки:

- Изменение интенсивности боли по визуальной аналоговой шкале (ВАШ) через 3, 6 и 12 месяцев терапии
- Динамика показателей качества жизни по опроснику SF-36

Вторичные конечные точки:

- Уровень простагландина F2α в менструальной крови (метод ИФА) в подгруппе пациентов (n=100)
- Влияние сопутствующих факторов (ИМТ, курение, физическая активность) на эффективность терапии
- Частота побочных эффектов

Уровень статистической значимости установлен при $p < 0,05$. Для оценки клинической значимости использовали величину эффекта (Cohen's d).

Контроль качества

Для обеспечения достоверности данных:

- Ведение индивидуальных дневников пациенток
- Ежемесячный мониторинг комплаенса
- Централизованный контроль качества УЗИ-исследований
- Двойной ввод данных в электронную базу

Статистический анализ:

- Для сравнения групп: критерий Краскела–Уоллиса с поправкой Данна.

— Многофакторный регрессионный анализ (пакет RStudio).

Результаты:

Таблица 1.

Сравнительная эффективность терапии через 6 месяцев

Группа	Δ ВАШ (баллы)	Улучшение SF-36 (%)	p-value
КОК 18–25	-4.9 ± 1.2	28.5 ± 6.1	<0.001
Контроль 18–25	-2.5 ± 1.1	12.3 ± 4.8	0.02
КОК 36–45	-1.3 ± 0.9	8.7 ± 3.2	0.18

Ключевые наблюдения:

- У 22 % пациенток 18–25 лет в группе КОК зафиксирована полная ремиссия боли.
- У женщин с ИМТ >30 эффективность КОК снижалась на 15 % ($p = 0.04$).

Обсуждение

Полученные данные согласуются с исследованиями, подчеркивающими роль гормональной регуляции в патогенезе дисменореи у молодых женщин [13, р. 90]. Ограниченная эффективность КОК в группе 36–45 лет может быть связана с накоплением коморбидной патологии (например, аденомиоза), требующей комбинированной терапии [4, с. 56].

Инновационный аспект:

Впервые продемонстрировано влияние ИМТ на ответ к КОК, что указывает на необходимость персонализации лечения.

Ограничения:

- Не учитывались диетические привычки.
- Отсутствие длительного катамнеза (более 1 года).

Результаты: В группе КОК у женщин 18–25 лет зафиксировано снижение боли на 62 % ($p < 0,001$), в то время как в контрольной группе (НПВС) — на 31 % ($p < 0,05$). В возрастной подгруппе 36–45 лет разница между группами была статистически незначимой ($p = 0,18$).

Заключение

1. Низкодозированные КОК — оптимальный выбор для женщин 18–35 лет с первичной дисменореей.
2. Пациенткам старше 35 лет рекомендовано расширенное обследование (УЗИ, онкомаркеры) перед назначением терапии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние приема комбинированных оральных контрацептивов на здоровье женщины / А.А. Журина, А.Е. Галаева, М.А. Пахомов, А.М. Морозов // *Forcipe*. 2020. Т. 3, № 51. С. 57–58.
2. Возможности применения комбинированных оральных контрацептивов для фармакотерапии предменструального синдрома и дисменореи при сопутствующих нарушениях психоневрологического характера / Е.А. Мостовская, А.Ц. Кошкина, О.В. Курушина [и др.] // *Молодежный инновационный вестник*. 2024. Т. 13, № 2. С. 85–86.
3. Иванов В.А., Зайцева О.Ю. Проблема дисменореи в современном обществе // *Интегративные тенденции в медицине и образовании*. 2023. Т. 3. С. 74–80.
4. Иванова О.В. Коморбидность при дисменорее // *Акушерство и гинекология*. 2024. № 1. С. 55–60.
5. Мынко О.И., Ашрафзянова Д.Р., Лобанова В.В. Комбинированные оральные контрацептивы: частота применения и возникновения побочных эффектов у женщин репродуктивного возраста // *Энигма*. 2020. № 26. С. 105–114.
6. Персонифицированная контрацепция (индивидуальный подбор комбинированных оральных контрацептивов в практике акушера-гинеколога) / Н.П. Жукова, Н.И. Киселева, И.М. Арестова, Л.Е. Радецкая // *Охрана материнства и детства*. 2022. № 1(39). С. 79–84.
7. Российское общество акушеров-гинекологов. Клинические рекомендации: Дисменорея. М., 2023. 34 с. URL: http://disuria.ru/_Id/15/1501_kr24N94MZ.pdf (дата обращения: 14.03.2025).
8. Филиппова И.Л. Психосоматические предпосылки болевого синдрома при дисменорее // *Мечниковские чтения-2022: материалы 95-ой Всерос. науч.-практ. студенческой конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 28 апреля 2022 г. Санкт-Петербург, 2022. Ч. I. С. 38–39.*
9. Хурасева А.Б., Святченко К.С. Двойной удар: использование комбинированных оральных контрацептивов с дроспиреноном в коррекции дисменореи и акне у девушек-подростков // *Эффективная фармакотерапия*. 2024. Т. 20, № 6. С. 14–17.
10. Эффективность и безопасность комбинированного контрацептива с хлормадинона ацетатом при обильных менструальных кровотечениях и дисменорее в реальной клинической практике / А.Р. Хачатурян, М.И. Ярмолинская, Е.В. Мишарина, А.А. Савина // *Вопросы гинекологии, акушерства и перинатологии*. 2022. Т. 21, № 4. С. 82–91.
11. ACOG. Committee Opinion No. 785: Dysmenorrhea // *Obstetrics and gynaecology*. 2023. Vol. 141 (2). P. 123–130.
12. Barcikowska Z. Inflammatory biomarkers in dysmenorrhea // *Journal of Clinical Medicine*. 2023. Vol. 12 (3). P. 45–52.
13. Chen L. Age-related differences in prostaglandin metabolism // *Reproductive Sciences*. 2024. Vol. 31 (1). P. 89–97.

© Тимофеев Илья Александрович (iliya.timofeew@yandex.ru); Пономарев Владислав Викторович (pvvkmldo@gmail.com);
Артюшков Виктор Валерьевич (11vik@mail.ru); Глашев Денис Александрович (denis_g999@list.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ СПАЕЧНОГО ПРОЦЕССА В ПЛЕВРАЛЬНОЙ ПОЛОСТИ У ЛАБОРАТОРНЫХ ЖИВОТНЫХ

EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THE METHOD OF PHOTODYNAMIC STIMULATION OF ADHESIONS IN THE PLEURAL CAVITY IN LABORATORY ANIMALS

A. Khmara
M. Polidanov
S. Kapralov
R. Petrunkin
N. Chupakhin
E. Gorbunova

Summary. The aim of the study is experimental substantiation of the method of stimulation of adhesion process in the pleural cavity in laboratory animals. *Materials and methods.* The research was carried out on 80 female laboratory rats of «standard» breed weighing 200 ± 50 g. All experimental animals were divided into two groups: 40 rats in each group. The first group included experimental animals that underwent pleurodesis of visceral and parietal pleural laminae by solid-state laser radiation (laser device Lasermed 1–10, near-infrared range), the second group included experimental animals that underwent pleurodesis of visceral and parietal pleural laminae by laser radiation of semiconductor device with simultaneous treatment with photosensitizer 5-aminolevulinic acid. General anesthesia of laboratory animals was performed according to the standard technique. Under aseptic conditions, a thoracotomy was performed through 5–6 intercostal spaces from periorbital to midclavicular line. Atypical resection of the lung was performed. Subsequently, the resection site and healthy (unchanged) lung area of the animals of the first group were exposed to the solid-state laser radiation with the wavelength of 1064 nm, power 7–8 W. Exposure to pleural sheets was performed with the help of quartz light guide by non-contact method, but not more than 2 cm from the pleura and visual assessment of the appearance of coagulation signs (as at direct contact with pleura its destruction occurs, and more than 2 cm — there will be no coagulation, this is due to the power density of the laser beam). Animals of the second group were exposed to laser radiation of semiconductor device «Atkus-2», wavelength 662 nm, output power 1 W, energy density 80–100 J/cm² in continuous mode for 15 minutes with simultaneous treatment of areas with photosensitizer 5-aminolevulinic acid. Exposure was carried out under visual control and stopped when signs of coagulation appeared. After that the chest wall wound was sutured. *Results.* Due to this method in experimental animals of the second group in comparison with the first group there was observed an earlier, more pronounced, and voluminous adhesion process, which was confirmed by the results of histologic study. *Conclusions.* Thus, the

Хмара Артём Дмитриевич

Кандидат медицинских наук, врач-хирург,
Саратовский государственный медицинский
университет им. В.И. Разумовского;
premdania@yandex.ru

Полиданов Максим Андреевич

специалист научно-исследовательского отдела,
Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург
maksim.polidanoff@yandex.ru

Капралов Сергей Владимирович

Доктор медицинских наук, доцент,
Саратовский государственный медицинский
университет им. В.И. Разумовского
sergejkapralov@yandex.ru

Петрунькин Родион Павлович

Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург

Чупахин Николай Владимирович

Кандидат медицинских наук, доцент,
Саратовский государственный медицинский
университет им. В.И. Разумовского
chupakhin-nik@yandex.ru

Горбунова Елена Сергеевна

Кандидат медицинских наук,
Саратовский государственный медицинский
университет им. В.И. Разумовского
stepelena@yandex.ru

Аннотация. Цель исследования — экспериментальное обоснование способа стимуляции спаечного процесса в плевральной полости у лабораторных животных. *Материалы и методы.* Исследования проводили на 80 лабораторных крысах-самках породы «стандарт» массой 200 ± 50 г. Все экспериментальные животные были разделены на две группы: по 40 крыс в каждой. В первую группу входили экспериментальные животные, которым осуществляли плевродез висцерального и парietального листков плевры излучением твердотельного лазера (лазерный аппарат Lasermed 1–10, ближнего инфракрасного диапазона), во вторую группу входили экспериментальные животные, которым осуществляли плевродез висцерального и парietального листков плевры лазерным излучением полупроводникового аппарата с одновременной обработкой фотосенсибилизатором — 5-аминолевулиновой кислотой. По стандартной методике проводили общую анестезию лабораторных животных. В асептических условиях выполняли торакотомию через 5–6 межреберья от окологривной до среднеключичной линии. Выполняли атипичную резекцию легкого. В дальнейшем на место резекции и здоровую (неизменённую) область легких животных первой группы воздействовали излучением твердотельного лазера длиной волны 1064 нм, мощностью 7–8 Вт. Воздействие на плевральные листки проводили при помощи кварцевого световода бесконтактным способом, но не более 2 см от плевры и визуальной оценкой появления признаков коагуляции (так как при прямом контакте с плеврой происходит её деструкция, а более 2 см —

conducted experiment proved that the use of 5-aminolevulinic acid as a photosensitizer and irradiation by the semiconductor device in a continuous mode for 15 minutes, allows to provide better adhesion after the completion of the formation of course-fiber connective tissue and to achieve denser and more extensive sclerosing when exposed to both pleural sheets, reducing the treatment period by 2 days.

Keywords: bullous emphysema, minimally invasive thoracoscopic surgeries, adhesion stimulation, laser surgery, photodynamic therapy.

не будет коагуляции, это связано с плотностью мощности лазерного луча). Животным второй группы на место резекции и здоровую (неизменённую) область легких воздействовали лазерным излучением полупроводникового аппарата, длиной волны 662 нм, мощностью на выходе 1 Вт, плотностью энергии 80–100 Дж/см² в непрерывном режиме в течение 15 минут с одновременной обработкой областей фотосенсибилизатором — 5-аминолевулиновой кислотой. Воздействие вели под визуальным контролем и прекращали при появлении признаков коагуляции. После чего зашивали рану грудной стенки. *Результаты.* Благодаря данному способу у экспериментальных животных второй группы по сравнению с первой группой наблюдался более ранний, выраженный и объемный спаечный процесс, что подтверждалось результатами гистологического исследования. *Выводы.* Таким образом, проведенный эксперимент доказал, что использование 5-аминолевулиновой кислотой в качестве фотосенсибилизатора и облучение полупроводниковым аппаратом в непрерывном режиме в течение 15 минут, позволяет обеспечить лучшую адгезию после завершения формирования грубоволокнистой соединительной ткани и достичь более плотного и более обширного склерозирования при воздействии на оба листка плевры, сокращая сроки лечения на 2 дня.

Ключевые слова: буллезная эмфизема, миниинвазивные торакоскопические операции, стимуляция спаечного процесса, лазерная хирургия, фотодинамическая терапия.

Введение

Эмфизема легких остается одной из наиболее распространенных патологий дыхательной системы, достигая распространенности 5,7 % в общей популяции [1]. Современная классификация различает буллезную болезнь легких, характеризующуюся образованием воздушных полостей в неизменной легочной ткани, и буллезную эмфизему, развивающуюся на фоне диффузного поражения респираторных отделов.

Наиболее серьезными осложнениями признаны спонтанный пневмоторакс (10–35 % госпитализаций), эмпиема плевры, легочные кровотечения и малигнизация пораженных участков [2–4]. Патогенетической основой служит дегенерация межальвеолярных перегородок с образованием расширенных воздушных пространств, преимущественно в верхних долях легких [5].

Буллезные изменения классифицируют по распространенности: от единичных полостей до диффузного поражения всех долей легкого [6, 7]. Особого внимания заслуживает онкологический риск — вероятность развития злокачественных новообразований в зонах буллезных изменений повышается в 4 раза [8,9].

Социальная значимость проблемы обусловлена ростом заболеваемости среди трудоспособного населения, сложностями диагностики и лечения, а также высокой частотой жизнеугрожающих осложнений. Это диктует необходимость совершенствования диагностических

алгоритмов, разработки новых хирургических методик и оптимизации подходов к профилактике осложнений.

Современная торакальная хирургия ставит перед собой важную задачу по совершенствованию методов лечения буллезной патологии легких. Разработка новых хирургических подходов направлена на повышение эффективности терапии и снижение частоты рецидивов. Для достижения этих целей требуется комплексный подход, включающий разработку инновационных оперативных методик, уточнение диагностических критериев, определение четких показаний к вмешательству и внедрение современных медицинских технологий [10].

Особую категорию представляют пациенты с идиопатическим спонтанным пневмотораксом, у которых отсутствуют явные признаки легочной патологии. Многочисленные исследования подтверждают тесную связь этого состояния с наличием субплевральных булл, обнаруживаемых у 76–100 % таких больных.

Диагностический процесс при подозрении на буллезные изменения требует обязательного применения современных методов визуализации. Компьютерная томография органов грудной клетки и торакоскопия признаны золотым стандартом диагностики. Отсутствие возможности проведения этих исследований значительно затрудняет своевременную диагностику и начало правильного лечения.

В связи с этим, обследование пациентов с подозрением на первичный спонтанный пневмоторакс должно

в обязательном порядке включать современные методы визуализации легких. Это позволяет не только подтвердить диагноз, но и выбрать оптимальную тактику лечения, что особенно важно для предотвращения рецидивов заболевания [11–14].

Выявление буллезных изменений в легочной ткани играет ключевую роль в определении стратегии лечения как первичного, так и рецидивирующего пневмоторакса. Клинический опыт свидетельствует, что даже единичный случай пневмоторакса при наличии булл является достаточным основанием для рассмотрения вопроса о плановом хирургическом вмешательстве [15–17].

Современные методы диагностики, включая компьютерную томографию органов грудной клетки (КТ ОГК), обладают высокой информативностью, но имеют определенные ограничения. В частности, выявление мелких воздушных полостей (булл диаметром менее 1 см) остается сложной задачей, что в ряде случаев требует применения дополнительных методов визуализации [18–20].

Особое внимание в клинической практике уделяется методикам плевродеза с использованием различных видов стимуляции — физической, химической или биологической. Данный подход рассматривается как перспективное решение для пациентов с патологиями плевральной полости, особенно при наличии противопоказаний к радикальным хирургическим вмешательствам [21–23]. Плевральные спайки, формирующиеся вследствие воспалительных процессов, травматических повреждений или перенесенных операций, требуют разработки менее инвазивных методов лечения с сохранением терапевтической эффективности [24, 25].

В торакальной хирургии плевродез занимает важное место среди альтернативных методов лечения. Процедура может выполняться тремя основными способами: физическим, химическим или биологическим воздействием на плевральные листки [26–29]. Проводимые клинические исследования направлены на уточнение показаний к процедуре, сравнительный анализ различных методик и оптимизацию протоколов выполнения, что особенно значимо для пациентов с абсолютными противопоказаниями к хирургическим вмешательствам.

Несмотря на очевидные преимущества плевродеза, для его широкого внедрения необходимы дальнейшие масштабные исследования. Они должны обеспечить надежную доказательную базу для стандартизации методики, объективной оценки ее эффективности и безопасности, а также определения оптимальных клинических показаний.

В связи с вышеперечисленным, целью исследования стало экспериментальное обоснование способа стиму-

ляции спаечного процесса в плевральной полости у лабораторных животных.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили на 80 лабораторных крысах-самках породы «стандарт» массой 200 ± 50 г. Все манипуляции и содержание животных было регламентировано локальным этическим комитетом Медицинского университета «Реавиз» (протокол № 10, 10.10.2024). Условия содержания в виварии лабораторных животных регламентированы РД-АПК 3.10.07.02-09 «Методические рекомендации по содержанию лабораторных животных в вивариях научно-исследовательских институтов и учебных заведений», приказом Министерства здравоохранения Российской Федерации от 01.04.2016 г. № 199н «Об утверждении правил надлежущей лабораторной практики», ГОСТ 33216-2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила содержания и ухода за лабораторными грызунами и кроликами» (актуализированным от 01.01.2021).

Все экспериментальные животные были разделены на две группы: по 40 крыс в каждой. В первую группу входили экспериментальные животные, которым осуществляли плевродез висцерального и париетального листков плевры излучением твердотельного лазера (лазерный аппарат Lasermed 1-10 (Россия), ближнего инфракрасного диапазона), во вторую группу входили экспериментальные животные, которым осуществляли плевродез висцерального и париетального листков плевры лазерным излучением полупроводникового аппарата (ЗАО «Полупроводниковые приборы», Санкт-Петербург) с одновременной обработкой фотосенсибилизатором — 5-аминолевулиновой кислотой (5-АЛК).

По стандартной методике проводили общую анестезию лабораторных животных. В асептических условиях выполняли торакотомию через 5–6 межреберья от околпозвоночной до среднеключичной линии. Выполняли атипичную резекцию легкого.

В дальнейшем на место резекции и здоровую (неизмененную) область легких животных первой группы воздействовали излучением твердотельного лазера длиной волны 1064 нм, мощностью 7–8 Вт. Воздействие на плевральные листки проводили при помощи кварцевого световода бесконтактным способом, но не более 2 см от плевры и визуальной оценкой появления признаков коагуляции (так как при прямом контакте с плеврой происходит её деструкция, а более 2 см — не будет коагуляции, это связано с плотностью мощности лазерного луча).

Животным второй группы на место резекции и здоровую (неизмененную) область легких воздействовали

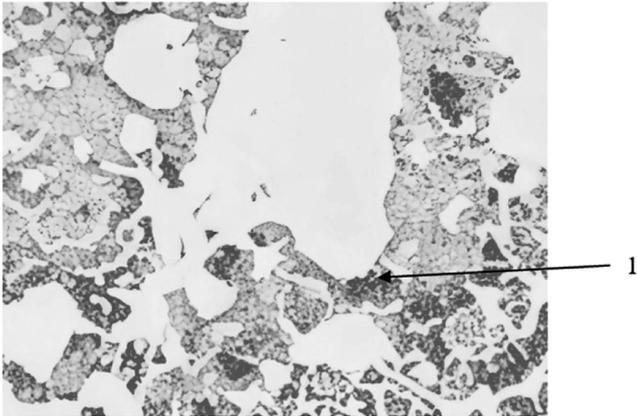


Рис. 1. Результаты микроскопического исследования плевральной полости лабораторных животных первой группы

Примечание: цифрой 1 на рисунке обозначено утолщение межальвеолярных перегородок, воспалительная мононуклеарная инфильтрация.

лазерным излучением полупроводникового аппарата, длиной волны 662 нм, мощностью на выходе 1 Вт, плотностью энергии 80–100 Дж/см² в непрерывном режиме в течение 15 минут с одновременной обработкой областей фотосенсибилизатором — 5-АЛК.

Воздействие вели под визуальным контролем и прекращали при появлении признаков коагуляции. После чего зашивали рану грудной стенки.

Результаты исследования

Благодаря данному способу у экспериментальных животных второй группы по сравнению с первой группой наблюдался более ранний, выраженный и объемный спаечный процесс, что подтверждалось результатами гистологического исследования.

Микроскопически: у животных первой группы на 14 день после проведения оперативного вмешательства в области лазерного воздействия на париетальный и висцеральный листки плевральной полости определя-

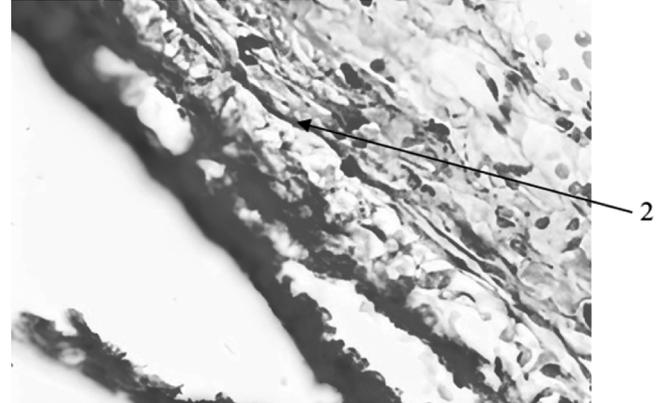


Рис. 2. Результаты микроскопического исследования плевральной полости лабораторных животных второй группы

Примечание: цифрой 2 на рисунке обозначено умеренное формирование молодых волокон соединительной ткани.

лось формирование рыхловолокнистой соединительной ткани, утолщение межальвеолярных перегородок с признаками отека, а также воспалительная мононуклеарная инфильтрация (рисунок 1), однако, во второй группе у животных уже на 12 день в области фотодинамического воздействия отмечалось формирование спаек на висцеральном и париетальном листках плевры, определялось умеренное формирование молодых волокон соединительной ткани, единичные мелкие кровоизлияния (рисунок 2).

Заключение

Таким образом, проведенный эксперимент доказал, что использование 5-АЛК в качестве фотосенсибилизатора и облучение полупроводниковым аппаратом в непрерывном режиме в течение 15 минут, позволяет обеспечить лучшую адгезию после завершения формирования грубоволокнистой соединительной ткани и достичь более плотного и более обширного склерозирования при воздействии на оба листка плевры, сокращая сроки лечения на 2 дня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клинические рекомендации «Эмфизема легких» (утв. Минздравом России, 2021 г.) 18.10.2021. Разработчик клинической рекомендации — Российское респираторное общество Одобрено Научно-практическим Советом Минздрава РФ.
2. Бродская О.Н., Поливанов Г.Э. Буллезная эмфизема и буллезная болезнь легких. Практическая пульмонология. 2019; 1: 15–21
3. Корымасов Е.А. и др. Национальные клинические рекомендации «Эмпиема плевры» — М.: 2015. — 33 с.
4. Базаров Д.В. Обоснование показаний и объема резекции при хирургическом уменьшении легкого у больных диффузной эмфиземой Дисс... на к.м.н. Москва. 2007. 1с.
5. Иванов С.В., Лазаренко В.А., Юдина С.М., и др. Цитоморфологические изменения в легких при моделировании буллезной эмфиземы в зависимости от стимуляции неокollaгеногенеза в эксперименте. Человек и его здоровье. 2019. №2.
6. Горбунков С.Д., Варламов В.В., Черный С.М., и др. Критерии хирургического риска у больных с диффузной эмфиземой лёгких с крупными или гигантскими буллами. Вестник хирургии 2016. №3.
7. Raouf S., et al. Cystic lung diseases: algorithmic approach. Chest. 2016; 150 (4): 945–965

8. Жестков К.Г., и др. Национальные клинические рекомендации по лечению спонтанного пневмоторакса. 2018; 22 с.
9. Яблонский П.К., и др. Выбор лечебной тактики и возможности прогнозирования рецидивов у больных с первым эпизодом спонтанного пневмоторакса. Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 11. Медицина. 2010; 1: 118–129.
10. Дробязгин Е.А., и др. Двухпортовые видеоторакоскопические операции при буллезной эмфиземе легких. Эндоскопическая хирургия. 2020; 26 (4): 22–27.
11. Корымазов Е.А., и др. Анализ ошибок, опасностей и осложнений в лечении спонтанного пневмоторакса. Тольяттинский медицинский консилиум. 2013; 3–4: 44–51.
12. Афендулов С.А., Мощин С.А. Современные способы лечения спонтанного пневмоторакса. Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2009; 8 (1): 58–61.
13. Полянцева А.А., и др. Ошибки, опасности, осложнения при первом эпизоде спонтанного пневмоторакса. Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. 2018; 3: 64–69.
14. Яблонский П.К. Протоколы оказания помощи пациентам со спонтанным пневмотораксом. СПб. 2013. — 42
15. Asano H., et al. Risk factors for recurrence of primary spontaneous pneumothorax after thoracoscopic surgery. J Thorac Dis. 2019; 11 (5): 1940–1944.
16. Bintcliffe O.J., et al. Lung Parenchymal Assessment in Primary and Secondary Pneumothorax. Annals of the American Thoracic Society. 2016; 13 (3): 350–355.
17. Сушко А.А., и др. Миниинвазивная хирургия пневмоторакса. Журнал Гродненского государственного медицинского университета. 2014; 3 (47): 21–23.
18. Соколов С.А., и др. Оригинальный способ тотальной плеврэктомии в радикальном оперативном пособии при первичном спонтанном пневмотораксе. Омский научный вестник. 2014; 128 (1): 60–62
19. Воробьев А.А., Калашников А.В., Салимов Д.Ш. Патологические проявления внутриплевральной адгезии. Современная наука и инновации. 2017; 1: 228–236.
20. Калашников А.В., Воробьев А.А., Салимов Д.Ш. и др. Стимуляция адгезиогенеза при хронической эмпиеме плевры. Новости хирургии. 2018; 4 (26): 412–419.
21. Чикинев Ю.В., и др. Анализ осложнений торакоскопических оперативных методов лечения буллезной формы эмфиземы легких. Сибирский научный медицинский журнал. 2018; 1: 65–68.
22. Милованов А.П. Патологоанатомический анализ причин смертей. — М.: Медицина. 2003; 76 с.
23. Чикинев Ю.В., Дробязгин Е.А., Пионтковская К.А., и др. Сравнительная оценка торакоскопии и деструкции булл в сочетании с плевродезом и плеврэктомией. Вестник хирургии. 2016. №2.
24. Иванов О.В., Клименко В.Н., Решетов А.В. Экономическое обоснование использование амбулаторного плевродеза в лечении экссудативных опухолевых плевритов. Ученые записки СПбГМУ им. И.П.Павлова. 2020. №1.
25. Чарышкин А.Л., Кузьмина Е.А., Хуснутдинов Б.И., и др. Методы лечения резистентного экссудативного плеврита. Ульяновский медико-биологический журнал. 2020. №1.
26. Плаксин С.А., Фаршатова Л.И. Диагностические и лечебные возможности видеоторакоскопии при плевральных выпотах различной этиологии. Пермский медицинский журнал. 2017. №2.
27. Плаксин С.А., Фаршатова Л.И. Роль торакоскопии и плевродеза в диагностике и лечении воспалительных плевральных выпотов. Вестник хирургии 2018. №6.
28. Хмара А.Д., Мудрак Д.А., Капралов С.В., Полиданов М.А., Данилов А.Д., Волков К.А., Петрунькин Р.П. Патоморфологическая оценка результатов экспериментального способа лазерного плевродеза у крыс. Морфологические ведомости. 2025; 33(1): id-916.
29. Хмара А.Д., Капралов С.В., Полиданов М.А., Масляков В.В., Данилов А.Д., Волков К.А. Хирургическая тактика в лечении двухсторонней буллезной эмфиземы легких. // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. 2025; №2: С.230–235.

© Хмара Артём Дмитриевич (premdania@yandex.ru); Полиданов Максим Андреевич (maksim.polidanoff@yandex.ru);
Капралов Сергей Владимирович (sergejkapralov@yandex.ru); Петрунькин Родион Павлович;
Чупахин Николай Владимирович (chupakhin-nik@yandex.ru); Горбунова Елена Сергеевна (stepelena@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

Наши авторы

Adaev R. — Graduate student, A.N. Kosygin Russian State University (Technology. Design. Art), Moscow

Afanasyev G. — Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University (National Research University)

Afanasyeva Z. — Professor, Kazan State Medical Academy, Ministry of Health, Kazan

Aleksandrova S. — Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Pskov State University»

Andreev D. — Radiologist, highest qualification category, State Budgetary Institution “Clinical Oncology Dispensary No. 1; Assistant, Department of Radiation Diagnostics No. 2 of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kuban State Medical University», Krasnodar

Artyushkov V. — Candidate of Medical Sciences, obstetrician-gynecologist, Regional Clinical Hospital No. 2, Krasnodar

Bednov P. — Graduate student, The Kosygin State University of Russia, Moscow

Beksaev N. — Postgraduate student, Emperor Alexander I St. Petersburg State University of Railway Engineering

Belova M. — Psychiatrist, Head of the V.A. Gilyarovskiy Psychiatric Hospital Branch of the Moscow City Hospital, P.B. Gannushkin Psychiatric Clinical Hospital No. 4

Bugero N. — Doctor of Biological Sciences, Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Pskov State University»

Burigina L. — Candidate of Medical Sciences, Chief Physician of the Moscow State Budgetary Institution «Psychiatric Clinical Hospital No. 4 named after P.B. Gannushkin»

Bykova Z. — Anesthesiologist-resuscitator care physician N.N. Burdenko Main Military Clinical Hospital

Chekulaev A. — Moscow State Academy of Veterinary Medicine, and Biotechnology named after K.I. Scriabin

Chernobrovkina T. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Academy of Postgraduate Education of the Federal Scientific, and Clinical Center for Specialized Medical Care and Medical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia

Our authors

Chupakhin N. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Dakieva L. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Ingush State University

Dementieva E. — Senior Developer, Moscow Technical University of Communications, and Informatics

Dolakov I. — Surgeon, Candidate of Medical Sciences, Senior Lecturer, Ingush State University

Ermakova T. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow City University

Figurov M. — graduate student, I. Kant Baltic Federal University

Galanina I. — Senior Lecturer, Pacific State University, Khabarovsk

Gazdieva M. — Ingush State University

Genina V. — Researcher, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Gezgieva R. — Surgeon, Candidate of Medical Sciences, Senior Lecturer, Ingush State University

Gilfanova R. — Surgeon, department of radiological surgical diagnostic and treatment methods №2, State Autonomous Healthcare Institution «Republican Clinical Hospital», Kazan

Glashev D. — Clinical Resident, Kuban State Medical University

Golubcov A. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Head, Department of Head and Neck Tumors, Federal State Budgetary Institution «Russian Scientific Center of Surgery named after B.V. Petrovskiy Academy», Moscow

Gorbunova E. — Candidate of Medical Sciences, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Gorkovoy A. — Candidate of Medical Sciences, endoscopist, highest qualification category, head, endoscopic department of the State Budgetary Institution «Clinical Oncology Dispensary No. 1», Krasnodar

Gribanova E. — Graduate student, Senior Lecturer, BSU, Minsk, Belarus

Igumnov S. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov

Istomina V. — Psychiatrist, Head of the General Psychiatry Department No. 19 of the V.A. Gilyarovskiy Psychiatric Hospital, a branch of the State Budgetary Healthcare Institution, Moscow, P.B. Gannushkin Psychiatric Clinical Hospital No. 4

Ivashchenko V. — Researcher, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovskiy

Kalistratov D. — Candidate of Technical Sciences, Independent researcher, Tula

Kapralov S. — Doctor of Medicine Sciences, associate professor, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovskiy

Kardashyan R. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba»

Kashikhin A. — Private University «Reaviz», Saint Petersburg

Kataeva L. — Professor, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University

Khakimova F. — Private University «Reaviz», Saint Petersburg

Khmara A. — Candidate of Medical Sciences, surgeon, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovskiy

Kim R. — Postgraduate student, Bauman Moscow State Technical University (National Research University)

Klassov A. — Researcher, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovskiy

Koledinskiy A. — Doctor of Medical Sciences, Head of the Peoples' Friendship University of Russia. Patrice Lumumba, Moscow

Kolosovskiy E. — Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Kostyuk G. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Chief Physician of the Moscow City Hospital, N.A. Alekseyev Psychiatric Clinical Hospital No. 1

Kozlov D. — Candidate of Medical Sciences, Cardiovascular Surgeon, State Budgetary Healthcare Institution «City Clinical Hospital named after F.I. Inozemtsev», Moscow

Kozlova A. — Oncologist, second category, department of antitumor drug therapy No. 1 of the State Budgetary Institution «Clinical Oncology Dispensary No. 1», Krasnodar

Makarova Yu. — oncologist highest qualification category, head, department of antitumor drug therapy No. 1 of the State Budgetary Institution «Clinical Oncology Dispensary No. 1» of the Ministry of Health of the Republic of Kazakhstan, Krasnodar

Malyavin M. — Graduate student, Moscow University of Information Technology — Moscow Institute of Architecture and Civil Engineering

Mishchuk B. — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, I. Kant Baltic Federal University

Mitrofanov D. — Doctor of Technical Sciences, Professor, Military Academy of Military AD of the Armed Forces of the RF named after Marshal of the Soviet Union A.M. Vasilevskiy, Smolensk

Murashko R. — Doctor of Medical Sciences, Chief Physician of the State Budgetary Institution «Clinical Oncology Dispensary No. 1», Chief Freelance Oncologist of the Federal State Budgetary Educational Institution of Health Care «Krasnodar State Medical University». State Educational Institution of Higher Professional Education «Kuban State Medical University», Krasnodar

Nemtseva L. — Researcher, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovskiy

Nikiforov I. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Academy of Postgraduate Education of the Federal Scientific, and Clinical Center for Specialized Medical Care and Medical Technologies of the Federal Medical and Biological Agency of Russia

Nistratov G. — Candidate of Medical Sciences, Doctor, Department of X-ray Surgical Methods of Diagnostics and Treatment No. 2, Branch of the Oncological Center No. 1 of the S.S. Yudin City Clinical Hospital, Moscow

Novikov K. — Postgraduate student, Penza State University

Obedkov V. — Graduate student, RANEPА P.A. Stolypin Volga Region Institute of Management, Saratov

Ozdoeva T. — graduate student, H.M. Berbekov state university

Paramonov M. — graduate student, Moscow State University of Civil Engineering

Pavlov V. — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Moscow University of Finance and Law

Pavlova E. — Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Pskov State University»

Pavlyuk D. — Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI

Perfiliev A. — Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, Institute of Chemistry, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok

Petrunkin R. — Private University «Reaviz», Saint Petersburg

Plotnikov A. — Graduate Student, Irkutsk State University of Railway Transport

Polidanov M. — research department specialist, University «Reaviz», Saint Petersburg

Ponomarev V. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Kuban State Medical University; Regional Clinical Hospital No. 2, Krasnodar

Popova E. — Researcher, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Rastanina N. — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Pacific State University, Khabarovsk

Rochshin E. — Candidate of Medical Sciences, prosthodontist, Orthodontist, Moscow State Medical and Dental University

Romashkova O. — Doctor of Engineering, Professor, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow

Rukhlyadyeva E. — Kirov State Medical University

Rykov S. — Doctor, Department of X-ray Surgical Diagnostics and Treatment No. 2, branch of the Oncological Center No. 1 of the S.S. Yudin City Clinical Hospital, Moscow

Sakovich N. — Doctor of technical sciences, associate professor, Bryansk State Agrarian University

Sevostyanov P. — Doctor of Technical Sciences, Professor, A.N. Kosygin Russian State University (Technology. Design. Art), Moscow

Silantev D. — Graduate student, MSTU «STANKIN»

Solobuto A. — graduate student, Moscow University of Finance and Law

Timofeev I. — Obstetrician-gynecologist, Regional Clinical Hospital No. 2

Titova A. — Senior Lecturer, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Pskov State University»

Torshkhoeva A. — Russian University of Medicine

Varlamov O. — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Bauman Moscow State Technical University (National Research University)

Verezubova N. — Candidate of economic sciences, associate professor, Moscow State Academy of Veterinary Medicine, and Biotechnology named after K.I. Scriabin

Veshneva N. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, The Kosygin State University of Russia, Moscow

Vesnina O. — Researcher, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Vlasova T. — Private University «Reaviz», Saint Petersburg

Volkov K. — Laboratory Assistant, N.G. Chernyshevsky Saratov National Research State University; Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Yakimova D. — Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Pskov State University»

Yakovlev I. — Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI

Zagorulko A. — Department of X-ray Surgical Methods of Diagnostics and Treatment No. 2, branch of the Oncological Center No. 1 of the S.S. Yudin City Clinical Hospital, Moscow; doctor, FGAOU VO «Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba», Moscow

Ziganshin M. — Coloproctologist, Head of the Department of Coloproctology, State Autonomous Healthcare Institution «Republican Clinical Hospital», Kazan

Требования к оформлению статей, направляемых для публикации в журнале



Для публикации научных работ в выпусках серий научно-практического журнала «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» принимаются статьи на русском языке. Статья должна соответствовать научным требованиям и общему направлению серии журнала, быть интересной достаточно широкому кругу российской и зарубежной научной общественности.

Материал, предлагаемый для публикации, должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, написан в контексте современной научной литературы, и содержать очевидный элемент создания нового знания. Представленные статьи проходят проверку в программе «Антиплагиат».

За точность воспроизведения дат, имен, цитат, формул, цифр несет ответственность автор.

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей без изменения научного содержания авторского варианта.

Научно-практический журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» проводит независимое (внутреннее) рецензирование.

Правила оформления текста.

- ◆ Текст статьи набирается через 1,5 интервала в текстовом редакторе Word для Windows с расширением “.doc”, или “.rtf”, шрифт 14 Times New Roman.
- ◆ Перед заглавием статьи указывается шифр согласно универсальной десятичной классификации (УДК).
- ◆ Рисунки и таблицы в статью не вставляются, а даются отдельными файлами.
- ◆ Единицы измерения в статье следует выражать в Международной системе единиц (СИ).
- ◆ Все таблицы в тексте должны иметь названия и сквозную нумерацию. Сокращения слов в таблицах не допускаются.
- ◆ Литературные источники, использованные в статье, должны быть представлены общим списком в ее конце. Ссылки на упомянутую литературу в тексте обязательны и даются в квадратных скобках. Нумерация источников идет в последовательности упоминания в тексте.
- ◆ Литература составляется в соответствии с ГОСТ 7.1-2003.
- ◆ Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Правила написания математических формул.

- ◆ В статье следует приводить лишь самые главные, итоговые формулы.
- ◆ Математические формулы нужно набирать, точно размещая знаки, цифры, буквы.
- ◆ Все использованные в формуле символы следует расшифровывать.

Правила оформления графики.

- ◆ Растровые форматы: рисунки и фотографии, сканируемые или подготовленные в Photoshop, Paintbrush, Corel Photopaint, должны иметь разрешение не менее 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, CMYK.
- ◆ Векторные форматы: рисунки, выполненные в программе CorelDraw 5.0-11.0, должны иметь толщину линий не менее 0,2 мм, текст в них может быть набран шрифтом Times New Roman или Arial. Не рекомендуется конвертировать графику из CorelDraw в растровые форматы. Встроенные — 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, CMYK.

По вопросам публикации следует обращаться к шеф-редактору научно-практического журнала «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» (e-mail: redaktor@nauteh.ru).