

ISSN 2223-2966



СОВРЕМЕННАЯ НАУКА:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 5-2 2025 (МАЙ)

Учредитель журнала
Общество с ограниченной ответственностью
«НАУЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал издается с 2011 года.

Редакция:

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

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

Издатель:

Общество с ограниченной ответственностью
«Научные технологии»

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

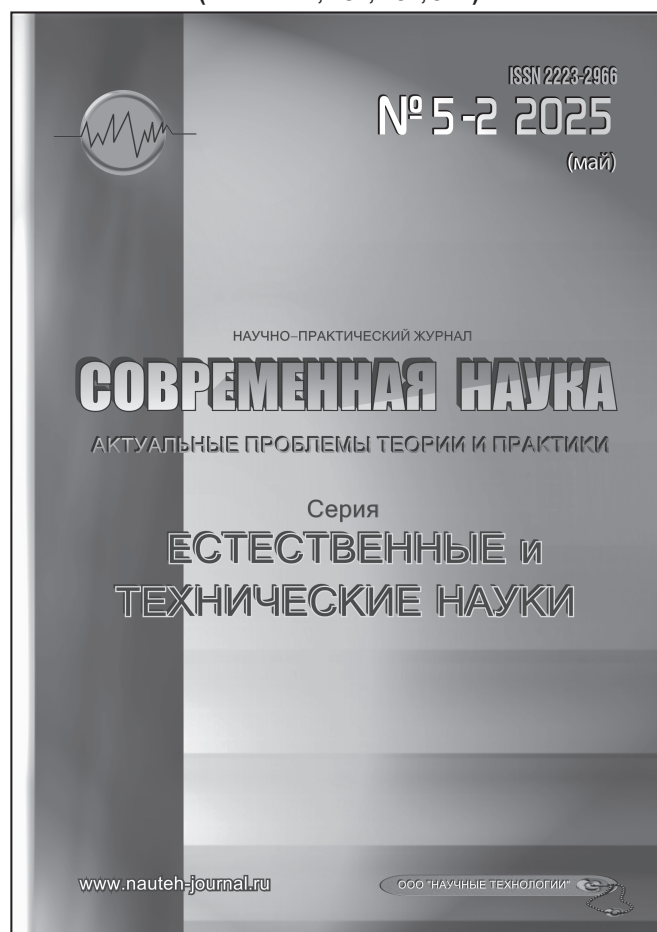
Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия.

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

Научно-практический журнал

Scientific and practical journal

(БАК — 1.1.2, 1.5.x, 2.3.x, 3.1.x)



В НОМЕРЕ:

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

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

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

Журнал отпечатан в типографии
ООО «КОПИ-ПРИНТ» тел./факс: (495) 973-8296
Подписано в печать 28.05.2025 г. Формат 84x108 1/16
Печать цифровая Заказ № 0000 Тираж 2000 экз.

ISSN 2223-2966



Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Общая биология

Алексеева С.И. — Оценка состояния озер центральной Якутии на примере Хангаласского улуса (района)
Alekseeva S. — Assessment of the condition of lakes in central Yakutia by the example of the Khangalasky district6

Дубина Е.В., Евтушенко И.Д. — Молекулярные механизмы устойчивости перца к черной бактериальной пятнистости
Dubina E., Yevtushenko I. — Molecular mechanisms of pepper resistance to bacterial black spot10

Польских С.В., Грызлов В.А. — Влияние минеральных добавок на рост и развитие телят красно-пёстрой породы
Poliskikh S., Gryzlov V. — Influence of mineral additives on growth and development of red-spotted calves .14

Суменкова О.А., Гузеева С.А., Жиликов Е.В., Ознобихина А.О. — Влияние антропогенной нагрузки на почвенный и лиственный покров в центральной части города Тюмени
Sumenkova O., Guzeeva S., Zhilyakov E., Oznobikhina A. — Influence of anthropogenic load on soil and foliage cover in the central part of Tyumen city19

Уваров М.М. — Исследование возможности сорбционной очистки сточных вод от органических загрязнителей, в том числе красителей, сорбентами, получаемыми из отходов льнопереработки
Uvarov M. — Investigation of the possibility of sorption wastewater treatment from organic pollutants, including dyes, with sorbents obtained from flax processing waste.....25

Шейко Е.А., Сатаева Т.П., Смаглий Н.Н., Решетник Г.В. — Непатогенные бактерии в противоопухолевой терапии
Sheyko E., Sataieva T., Smaglyi N., Reshetnik G. — Non-pathogenic bacteria in antitumor therapy29

Информатика, вычислительная техника и управление

Борисенко Д.Д., Коваленко К.Д. — Возможности применения технологий искусственного интеллекта для анализа рисков при рассмотрении заявок на ипотечное кредитование
Borisenko D., Kovalenko K. — The possibilities of using artificial intelligence technologies to analyze risks when considering mortgage applications33

Борисенко Д.Д., Коваленко К.Д. — Разработка плана проведения и оценки результатов аудита готовности предприятия к цифровой трансформации
Borisenko D., Kovalenko K. — Development of a plan for conducting and evaluating the results of an audit of the company's readiness for digital transformation38

Галимнуров А.А. — О регуляризации средневзвешенного метода Монте-Карло
Galimnurov A. — About regularisation of the weighted average Monte Carlo method43

Горячкин Б.С., Алексеев А.С. — Оценка времени выполнения запросов изменения и удаления в NoSQL и объектно-реляционной базе данных
Goryachkin B., Alekseev A. — Estimation of execution time for modification and deletion queries in NoSQL and object-relational database.....47

Грищенко С.С., Иванин А.Н. — Методика повышения устойчивости оптических транспортных сетей связи в условиях угроз информационной безопасности возникающих на физическом и канальном уровнях
Grishchenko S., Ivanin A. — A technique for increasing the stability of optical transport communication networks in the context of information security threats arising at the physical and channel levels ...52

Жуков Е.А., Иванов В.И. — Вклад магнитной волны в генерацию продольной акустической волны при движении доменной границы в ортоферрите иттрия в присутствии внешнего магнитного поля и поглощения

Zhukov E., Ivanov V. — Of a longitudinal acoustic wave during the movement of a domain wall in yttrium orthoferrite in the presence of an external magnetic field and absorption58

Ильин А.Ю., Плотников С.Б. — Использование регрессионного анализа для оценки влияния веса модели и точности прогнозирования на производительность веб-приложения
Ilyin A., Plotnikov S. — Using regression analysis to assess the impact of model weight and forecasting accuracy on web application performance64

Кожиев А.Ю., Теслюк В.С. — Предиктивный анализ межотраслевых инновационных проектов с использованием аддитивных технологий в высокотехнологичных отраслях
Kozhiev A., Teslyuk V. — Predictive analysis of cross-sector innovation projects using additive technologies in high-tech industries69

Костенко Д.О., Коротков Е.В., Короткова М.А. — Распределённая система для построения множественных выравниваний символьных последовательностей методом MAHDS
Kostenko D., Korotkov E., Korotkova M. — Distributed system for multiple sequence alignment by means of MAHDS method73

Костенко Д.О., Коротков Е.В., Короткова М.А. — Свойства метода MAHDS с учётом корреляций символов в контексте выравнивания аминокислотных последовательностей
Kostenko D., Korotkov E., Korotkova M. — Properties of the MAHDS method considering character correlations in the context of amino acid sequences alignment79

Куровский С.В., Мишин Д.А., Яценко Е.О. — Особенности автоматизации биотехнологических процессов в пищевой промышленности
Kurovsky S., Mishin D., Yatsenko E. — Features of automation of biotechnological processes in the food industry87

Маципудра П.Е., Шмаков В.Э. — Концепция системы интеллектуального управления и балансировки нагрузки для API-сервисов искусственного интеллекта

Matsipudra P., Shmakov V. — Concept of intelligent control and load balancing system for artificial intelligence API services93

Потапова К.А., Исаева И.А., Габриелян Г.А. — Исследование методов векторизации научных текстов для многозадачной классификации на основе различного объема данных
Potapova K., Isaeva I., Gabrielyan G. — Study of vectorization methods of scientific texts for multi-task classification based on various data volumes99

Ремарчук В.Н., Горячкин Б.С., Гвоздева Я.В., Малина С.В. — Технология анализа тональностей текстов с помощью сверточной нейронной сети
Remarchuk V., Goryachkin B., Gvozdeva Ya., Malina S. — Technology for analyzing text tones using a convolutional neural network 106

Русаков А.М., Комаров К.Ю., Корягин С.В., Корягина В.М. — Современные подходы к анализу текстовой информации о событиях безопасности на основе методов искусственного интеллекта
Rusakov A., Komarov K., Koryagin S., Koryagina V. — Modern approaches to the analysis of textual information about security events based on artificial intelligence methods 113

Савельева Ю.О., Кулагина Н.А., Ваулин В.И., Лукьянов А.А. — Разработка системы уведомлений об авариях на предприятиях в виде Telegram-бота с помощью платформы Camunda
Savelieva Yu., Kulagina N., Vaulin V., Luk'yanov A. — Development of a system notifying about emergencies at enterprises in the form of a Telegram bot using the Camunda platform 121

Салихов М.Р. — Разработка практических рекомендаций для системы распределенного хранения криптографических ключей на основе схемы шардирования
Salikhov M. — Development of practical recommendations for a distributed cryptographic key storage system based on sharding scheme 130

Шалобанов С.В., Шалобанов С.С. — Поиск структурного дефекта в дискретных динамических системах методом пробных отклонений параметров модели
Shalobanov S., Shalobanov S. — Search for structural defect in discrete dynamic systems by the method of trial deviations of model parameters 135

Клиническая медицина

Алиева С.П. — Применение хирургического шаблона в имплантологии: преимущества, недостатки и клинические случаи

Alieva S. — Use of surgical template in implantology: advantages, disadvantages and clinical cases. 138

Беккелдиева Н.Б., Семиглазов В.Ф., Криворотко П.В., Зернов К.Ю. — Рецидив HER2-позитивного рака молочной железы у пременопаузальных и постменопаузальных пациентов, достигших патоморфологический полный ответ на неoadъювантную системную терапию

Bekkeldieva N., Semiglazov V., Krivorotko P., Zernov K. — Recurrence of HER2-positive breast cancer in premenopausal and postmenopausal patients who have achieved a pathologically complete response to neoadjuvant systemic therapy 143

Русинова А.К. — Машинное обучение в диагностике эндометриоза

Rusinova A. — Machine learning in the diagnosis of endometriosis. 149

Третьякова И.Е. — Влияние различных способов активации клеток на уровень секреции

провоспалительных цитокинов нейтрофилами крови человека

Tretyakova I. — The effect of various cell activation methods on the level of secretion of pro-inflammatory cytokines by human blood neutrophils. 157

Хоконова Т.М., Хараева З.Ф., Сохрокова Н.М., Сохрокова Д.М., Эльбаева А.Д. — Маркерный профиль сыворотки при двойной кардиальной патологии: артериальная гипертензия и ишемическая болезнь сердца

Khokonova T., Kharaeva Z., Sokhroкова N., Sokhroкова D., Elbaeva A. — Serum marker profile in dual cardiac pathology: arterial hypertension and coronary heart disease 160

Чубовский А.И., Кивва А.Н., Евлахова И.С., Загреба И.В. — Исследование инновационных методов лапароскопической хирургии при лечении сложных заболеваний органов брюшной полости у пациентов пожилого возраста

Chubovskiy A., Kivva A., Evlakhova I., Zagreba I. — A study on innovative laparoscopic surgery methods in the treatment of complex abdominal diseases in elderly patients 165

Наши авторы 171

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОЗЕР ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ НА ПРИМЕРЕ ХАНГАЛАССКОГО УЛУСА (РАЙОНА)¹

ASSESSMENT OF THE CONDITION OF LAKES IN CENTRAL YAKUTIA BY THE EXAMPLE OF THE KHANGALASKY DISTRICT

S. Alekseeva

Summary. The article is devoted to the assessment of the state of lakes in Central Yakutia. Fresh water is a single resource. There are few areas in the world that are not affected by the problems of loss of potential fresh water supplies, deterioration of water quality, and pollution of surface and groundwater sources. The main problems that adversely affect water quality arise, depending on the circumstances, with varying degrees of severity as a result of inadequate treatment of domestic wastewater, poor control of industrial wastewater discharges, loss and destruction of watersheds, irrational siting of industrial plants, deforestation, uncontrolled fallow farming, and unsustainable agricultural practices [7]. The lakes of Central Yakutia, despite their poor study, are actively used by the population of agricultural settlements as a source of drinking water. To compensate for the existing lack of information, the author provides a hydrochemical characteristic, a comprehensive assessment of the water quality of the studied lakes, which are part of 3 rural settlements of the Khangalassky district. A comparative assessment of the results of chemical analysis and bioindication is carried out. For the first time, zonal changes in the total hardness of water, as well as concentrations of calcium and magnesium ions dissolved in water, are established for the study area.

Keywords: lake, hydrochemical characteristics, rural settlement, Central Yakutia, Khangalassky district.

Алексеева Саргылана Ильинична

Соискатель, ФГАУ ВО «Северо-Восточный федеральный
университет имени М.К. Аммосова»;
учитель биологии, МОБУ СОШ №20
имени Героя Советского союза Ф.К. Попова, г. Якутск
alekseeva.sargy@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена оценке состояния озер Центральной Якутии. Запасы пресной воды представляют собой единый ресурс. Рассчитанное на длительную перспективу освоение мировых ресурсов пресной воды требует целостного подхода к использованию этих ресурсов и признания взаимозависимости между элементами, составляющими запасы пресной воды и определяющими ее качество [6, 9]. Основные проблемы, отрицательно влияющие на качество воды рек и озер, возникают от обстоятельств, с разной степенью остроты в результате несоответствующей очистки бытовых сточных вод, слабого контроля за сбросом промышленных сточных вод, утраты и разрушения водосборных площадей, нерационального размещения промышленных предприятий, обезлесения, бесконтрольной залежной системы земледелия и нерациональных методов ведения сельского хозяйства [7].

Озера Центральной Якутии при своей слабой изученности активно используются населением сельскохозяйственных поселений в качестве источника питьевой воды. Для восполнения существующего недостатка сведений автором дана гидрохимическая характеристика, комплексная оценка качества воды исследуемых озер, входящих в 3 сельских поселения (населенных пунктов) Хангаласского улуса (района). По морфогенетической классификации И.И. Жиркова, преобладающая часть исследуемых объектов принадлежит озерам термокарстового генезиса. Подчеркнуто, что в исследуемом районе преобладали очень малые озера.

Выполнена сравнительная оценка результатов химического анализа, биоиндикации и биотестирования. Впервые для района исследования установлены зональные изменения общей жесткости воды, а также концентраций, растворенных в воде ионов кальция и магния.

Ключевые слова: озеро, гидрохимическая характеристика, сельское поселение, Центральная Якутия, Хангаласский улус (район).

Введение

Из-за ухудшения экологического состояния рек в Якутии, основных источников питьевой воды, для населения альтернативным источником питьевой воды становятся малые озера. Это обуславливает актуальность определения качества воды исследованных озер.

Для сельских поселений Республики Саха (Якутия) проблема обеспечения населения доброкачественной

питьевой водой на сегодняшний день является очень актуальной. Исторически и географически сложилось, что большинство сельских населенных пунктов размещаются около озер. Тем не менее, озера, используемые для водоснабжения, быстро деградируют в результате взаимодействия природных и антропогенных факторов, поэтому приходится доставлять воду из водоемов, расположенных на больших расстояниях от сельских поселений. Озера, которые расположены дальше от населенных пунктов, могут быть пригодны для питьевой воды, так как на них не воздействуют антропогенные факторы.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-34-90046.

Целью работы является определение качественного и количественного состава озер на территории сельских поселений Булгунняхтах, Верхний Бестях, входящих по административному делению Республики Саха (Якутия) в состав Хангаласского улуса (района). Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- 1. Сделать анализ гидрохимических показателей озер.
- 2. Провести комплексную оценку качества воды исследуемых озер.
- 3. Сделать выводы.

Материал и методы исследования

Объектом исследования являются 3 разнотипных озер, расположенных на территории Хангаласского улуса (района).

Озеро № 1 — озеро окрестности с. Верхний Бестях, Хангаласский улус, Центральная Якутия.

Таблица 1.

Методы исследования

Методы исследования	Показатели
Органолептический	Физические свойства воды
Колориметрический	NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , Fe^{3+} , NH_4^+ pH
Объемный анализ (титриметрический)	Комплексонометрия — жесткость, Ca^{2+}
	Ацидиметрия — щелочность, HCO_3^- , CO_3^{2-}
	Аргентометрия — Cl^-
	Метод Винклера — O_2 , БПК5
Расчетный метод	Минерализация, Mg^{2+} , Na^+

Озеро № 2 — окрестности с. Булгунняхтах (южная часть), Хангаласский улус, Центральная Якутия.

Гидрохимические показатели исследованных озер

Таблица 2.

Наименование	Озеро № 1				Озеро № 2				Озеро № 3			
	Поверхность		Дно		Поверхность		Дно		Поверхность		Дно	
Глубина, м	1,4				0,8				0,8			
Прозрачность, м	0,6				До дна				0,6			
Температура воды, °С	25,3		24,2		24		23		23		21	
Цветность, градус	Очень слабое желтоватое (15)		светло-желтоватое (60)		Слабо-желтоватое		Светло-желтоватое (60)		Слабо-желтоватое		Светло-желтоватое (60)	
Запах, балл	2		4		3		4		2		4	
Характер запаха	Древесный		Болотный, гнилостный, землистый		Землистый, гнилостный		Гнилостный, землистый		Землистый, гнилостный		Болотный	
Мутность	Слабомутная		Слабомутная		Не заметна		Незаметна		Незаметна		Не заметна	
Осадок			Заметный большой, светло-бурый, рыхлый, хлопьевидный				Незначительный, светло-бурый, песчаный				Незначительный, светло-бурый	
Водородный показатель (pH)	8,7		7,5		8,4		8,4		8,5		8,5	
Растворенный O ₂ , мг/л	3,13		1,49		2,67		1,89		4,8		5,6	
Свободная двуокись углерода (CO ₂ своб.) мг/л	376,1		389,7		178,9		334,3		748,6		799,2	
	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л
Ca ²⁺	32	1,6	40	2	36,8	1,84	37,2	1,86	7,2	0,36	8	0,4

Озеро № 3 — окрестности с. Булгунняхтах (восточная часть), Хангаласский улус, Центральная Якутия.

Улус расположен на Приленском плато и в пойме реки Лены, в которой расположены почти все населенные пункты улуса. По левому берегу реки Лены — долины Эркээни [12].

Климат Центральной Якутии резко-континентальный. Средняя температура января -40°C , июля $+19^{\circ}\text{C}$. Осадков выпадает в год от 200 мм до 350 мм [7].

Материал для исследований был собран во время полевых работ в весенне-летний период 2020–2021 гг. Озера, согласно морфогенетической классификации И.И. Жиркова [3, 4, 5], имеют термокарстовое происхождение.

Морфометрия озер отражает, с одной стороны, специфику развития котловины, а с другой стороны, — процессы, протекающие в водной массе озер. В качестве основных анализируемых морфометрических показателей нами выбраны площадь водной поверхности, длина и ширина озера, его максимальная и средняя глубины. При типизации озер по площади водного зеркала использована классификация П.В. Иванова [6].

Для оценки физических свойств воды применен органолептический метод. Для изучения показателей солей применен метод колориметрический метод.

Результаты и их обсуждение

Комплексная оценка качества воды исследуемых озер была проведена в соответствии с индексом загрязненности воды. Расчет ИЗВ показал, что исследуемые озера относятся к II и III классам качества, чистые и умеренно загрязненные.

Вода озера №1 имеет умеренную жесткость, загрязнена органическими веществами, солевой состав — гидрокарбонатно-кальциевый, вода озера №2 имеет мягкую жесткость, солевой состав — гидрокарбонатно-натриевый, вода озера №3 характеризуется значительной жесткостью, гидрокарбонатно-натриевым солевым составом.

Как видно из таблицы 3, в озере №3 содержание элементов преобладают практически по всем пунктам.

Поверхность и дно озер №1 и №2 умеренно загрязненные, поверхность озера №3 чистая, дно озера №3 тоже умеренно загрязнено.

Таблица 3.

Химический анализ колориметрическим методом

№	Показатели	Озеро №1	Озеро №2	Озеро №3
1	Mg^{2+}	17,08	3,416	29,28
2	Na^{+}	10,492	56,35	123,74
3	CO_3^{2-}	н/о	н/о	н/о
4	HCO_3^{-}	195,2	244	378,2
5	Cl^{-}	22,01	40,47	67,45
6	SO_4^{2-}	2	75	2
7	NO_3^{-} , мг/л		0,80	0,50
8	NO_2^{-} , мг/л	0	0	0
9	NH_4^{+} , мг/л	0,15	0,30	0,15
10	$\text{Fe}_{\text{общ.}}$, мг/л	—	—	—
11	PO_4^{3-} , мг/л	0,20	0,20	0,20
12	Окисляемость	16	16	16
13	Биохимическое потребление кислородом (БПК ₅),	8,1	5,8	4,2
14	Общая жесткость, ммоль/л	3	3,24	1,06
15	Общая минерализация, мг/л	278,782	338,482	456,836

Таблица 4.

Характеристика комплексной оценки качества исследуемых озер по ИЗВ (индекс загрязнения вод)

Озеро	Водные слои	ИЗВ	Класс / качества воды	Оценка качества воды
№1	Поверхность	1,11	III	Умеренно загрязнённый
	Дно	1,53	III	Умеренно загрязнённый
№2	Поверхность	1,06	III	Умеренно загрязнённый
	Дно	1,85	III	Умеренно загрязнённый
№3	Поверхность	0,86	II	Чистый
	Дно	1,55	III	Умеренно загрязнённый

Заключение и выводы

Воды исследуемых озер по рассмотренным параметрам соответствуют требованиям Федерального санитарно-эпидемиологического управления (за исключением окисляемости перманганата). Воды озер №1 и №2

Таблица 5.
Результаты оценки качества воды озер
биотестированием и биоиндикацией

Озеро	Сумма частоты встречаемости (2)	Произведение типа водоема (1) и (2) = (3)	Индекс сапробности (3): (2)	Класс чистоты (по Г. Либману)	Трофность
№1	43	80	1,86	I	Олиготрофный
№2	9	27	3,0	III	Мезотрофный
№3	6	12	2,0	II	Мезотрофный

могут быть пригодны для приготовления питьевого льда и питьевой воды, а №3 могут быть использованы для бытовых целей.

Сравнены результаты химического анализа, биоиндикации и биотестирования. Все озера, кроме №1, соответствуют заданным классам. №2 и №3 имеют соответственно третий и второй класс качества воды. По результатам химического анализа №1 имеет третий класс качества воды из-за высокого содержания нитратов и окисления, а по результатам биоиндикации и биотестирования — первый класс. Это связано с тем, что природные отходы не влияют на растительный состав водоема.

ЛИТЕРАТУРА

1. Городничев Р.М., Пестрякова Л.А., Ядрихинский И.В. 2015. Взаимосвязи диатомовых водорослей с морфометрическими, гидрохимическими характеристиками и параметрами местоположения озер Севера Якутии. Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, 6 (50): 14–26.
2. Жирков И.И. 1977. К ландшафтно-генетической классификации озер Центральной Якутии. Природа и хозяйство Сибири, 32–33.
3. Жирков И.И. 1983. Морфогенетическая классификация как основа рационального использования, охраны и воспроизводства природных ресурсов озер криолитозоны (на примере Центральной Якутии). В кн.: Вопросы рационального использования и охраны природных ресурсов разнотипных озер криолитозоны (на примере Центральной Якутии). Якутск, Якутский университет: 4–47.
4. Жирков И.И. 2000. О классификации озер холодных регионов. В кн.: Озера холодных регионов. Материалы международной конференции. Якутск, 20–24 июня 2000 года. Якутск. Часть 1. Вопросы теории, методики, лимногенеза, классификации и районирования. Якутский государственный университет: 84–93.
5. Жирков И.И., Трофимова Т.П., Тастыгина С.К., Жирков К.И. 2019. Лимнологическая характеристика озера Киянки Чурапчинского улуса РС(Я). Успехи современного естествознания, 6: 57–61.
6. Иванов П.В. 1948. Классификация озер мира по величине и по их средней глубине. Бюллетень ЛГУ, 20: 29–36.
7. Ксенофонтова М.И. 2013. Анализ деградации термокарстовых озер при интенсивном сельскохозяйственном освоении. Антропогенная трансформация природной среды, 1: 121–125.
8. Ксенофонтова М.И., Ушницкая Л.А. 2008. Экологическая оценка состояния озер Лено-Амгинского междуречья. Проблемы региональной экологии, 2: 12–14.
9. Мякишева Н.В. 2009. Многокритериальная классификация озер. СПб., Российский государственный гидрометеорологический университет, 160 с.
10. Поисеев И.И. 2017. Общие и внутрирегиональные особенности земельного фонда Республики Саха (Якутия). Проблемы современной экономики, 3 (63): 152–156.
11. Руфова А.А., Ксенофонтова М.И. 2015. Гидрохимический состав как один из индикаторов современных условий формирования озер (на примере г. Якутска). Наука и Образование, 2 (78): 145–151.
12. Соловьев П.А. 1959. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. М., АНН СССР, 144 с.
13. Ушницкая Л.А., Пестрякова Л.А., Субетто Д.А., Троева Е.И. 2014. Морфометрическая характеристика озер Лено-Амгинского междуречья. Наука и Образование, 4 (76): 71–76.
14. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. Palaeontologia Electronica, 4 (1): 1–9.

© Алексеева Саргылана Ильинична (alekseeva.sargy@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ УСТОЙЧИВОСТИ ПЕРЦА К ЧЕРНОЙ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ПЯТНИСТОСТИ

MOLECULAR MECHANISMS OF PEPPER RESISTANCE TO BACTERIAL BLACK SPOT

**E. Dubina
I. Yevtushenko**

Summary. The article is devoted to the study of molecular mechanisms of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) resistance to bacterial black spot, the causative agent of which is bacteria of the genus *Xanthomonas*. The paper considers the features of plant defense reactions at the molecular level, including the participation of specific genes and signaling cascades, activation of the immune response and possible accumulation of antimicrobial compounds. The experimental part of the study includes the analysis of 15 pepper varieties using PCR and primers of the 25-1 series aimed at identifying potential resistance loci. The obtained amplification profiles were analyzed using gel electrophoresis methods and bioinformatics resources (KEGG, NCBI), which made it possible to preliminarily differentiate the varieties by the degree of possible resistance. The efficiency of using molecular marker approaches in breeding aimed at creating forms resistant to bacterial pathogens is substantiated. The presented results expand the understanding of the genetic basis of resistance in cultivated plants and can be used in applied genetics and plant growing.

Keywords: molecular mechanisms, resistance, *Capsicum annuum* L., bacterial black spot, *Xanthomonas* spp., PCR analysis, primers 25-1, amplification profile, marker-assisted selection, bioinformatics, plant breeding.

Дубина Елена Викторовна

доктор биологических наук, профессор РАН,
ФГБНУ «Федеральный научный центр риса», г. Краснодар
Lenakrug1@rambler.ru

Евтушенко Илья Дмитриевич

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный
университет имени И.Т. Трубилина», г. Краснодар
klon2200@bk.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию молекулярных механизмов устойчивости перца сладкого (*Capsicum annuum* L.) к черной бактериальной пятнистости, возбудителем которой являются бактерии рода *Xanthomonas*. В работе рассмотрены особенности защитных реакций растения на молекулярном уровне, включая участие специфических генов и сигнальных каскадов, активацию иммунного ответа и возможное накопление антимикробных соединений. Экспериментальная часть исследования включает анализ 15 сортов перца с применением ПЦР и праймеров серии 25-1, направленных на выявление потенциальных локусов устойчивости. Полученные амплификационные профили проанализированы с использованием методов гелелектрофореза и биоинформатических ресурсов (KEGG, NCBI), что позволило предварительно дифференцировать сорта по степени возможной устойчивости. Обоснована эффективность применения молекулярно-маркерных подходов в селекции, направленной на создание устойчивых к бактериальным патогенам форм. Представленные результаты расширяют представление о генетических основах устойчивости культурных растений и могут быть использованы в прикладной генетике и растениеводстве.

Ключевые слова: молекулярные механизмы, устойчивость, *Capsicum annuum* L., черная бактериальная пятнистость, *Xanthomonas* spp., ПЦР-анализ, праймеры 25-1, амплификационный профиль, маркерная селекция, биоинформатика, селекция растений.

Введение

Черная бактериальная пятнистость, вызываемая бактериями рода *Xanthomonas* spp., является одной из самых разрушительных болезней, поражающих перец (*Capsicum annuum* L.). Патоген вызывает появление водянистых пятен на листьях, стеблях и плодах, что снижает товарную ценность урожая и может приводить к значительным экономическим потерям. Особенно остро эта проблема стоит в странах с развивающимся сельским хозяйством, где перец занимает важное место в структуре потребления и экспорта [1].

Борьба с бактериальной пятнистостью требует комплексного подхода, включая профилактические агротехнические мероприятия, применение биологических препаратов и, прежде всего, селекцию устойчивых со-

ртов. В этой связи особое значение приобретают исследования, направленные на выявление и использование молекулярных механизмов устойчивости растений к патогенам.

Одним из ключевых компонентов первичного иммунного ответа растения является клеточная стенка, которая служит как физическим, так и биохимическим барьером на пути патогена [2]. Она участвует в запуске сигнальных каскадов, активирующих экспрессию генов, связанных с устойчивостью. Помимо структурных элементов, важную роль играют молекулярные взаимодействия на уровне «растение — патоген», в которых задействованы белки, сигнальные молекулы, вторичные метаболиты и специфические рецепторы, распознающие бактериальные эффекторные белки [3].

Современные исследования показывают, что устойчивость перца к бактериальной пятнистости может быть связана с наличием специфических генов, таких как Bs2 и Bs3, активирующих гиперчувствительный ответ и синтез антимикробных соединений [4, 5]. Кроме того, рецессивные формы устойчивости обеспечивают широкий спектр защиты без выраженной гиперчувствительности, что также представляет интерес для селекции [6].

С внедрением молекулярно-маркерной селекции (MAS) появилась возможность точечной идентификации устойчивых генотипов уже на ранних стадиях развития растений [7]. Это позволяет значительно сократить сроки выведения новых сортов, устойчивых к бактериальным патогенам. Дополнительный импульс в этом направлении дали биоинформатические методы, позволяющие выявлять кандидаты в гены устойчивости на основе анализа аннотированных геномов и баз данных, таких как KEGG [8].

Таким образом, понимание молекулярных основ устойчивости перца к *Xanthomonas* spp. и применение современных геномных подходов открывают новые перспективы в селекции и создании устойчивых сортов, способных эффективно противостоять черной бактериальной пятнистости.

Цель и задачи исследования

Цель исследования — изучить молекулярные механизмы устойчивости *Capsicum annuum* L. к возбудителю черной бактериальной пятнистости (*Xanthomonas* spp.), с акцентом на выявление и характеристику генов устойчивости, а также на применение молекулярных маркеров и биоинформатических подходов для селекции устойчивых форм.

Задачи исследования:

Провести анализ литературных данных, касающихся структуры и функций генов, обеспечивающих устойчивость к бактериальной пятнистости у перца.

Оценить роль клеточной стенки и связанных с ней сигнальных каскадов в формировании защитного ответа у растений.

Выявить ключевые доминантные и рецессивные гены устойчивости (Bs2, Bs3 и др.), участвующие в формировании иммунного ответа.

Рассмотреть возможности применения молекулярных маркеров и технологий MAS (Marker-Assisted Selection) для ускорения селекционного процесса.

Использовать биоинформатические инструменты для поиска и аннотации генов устойчивости в геномах перца с опорой на базы данных (например, KEGG).

Обосновать перспективные направления по созданию новых устойчивых сортов на основе полученных данных.

Материалы и методы исследования. Исследования проводились в 2024 году, на базе лаборатории цифровых, информационных и биотехнологий ФГБНУ «Федеральный научный центр риса» (г. Краснодар).

Объектом исследования являлись 15 образцов сладкого перца (*Capsicum annuum* L.), отобранных из коллекции 2022 года, зарегистрированной в г. Пущин. Все сорта имели российское происхождение. Перечень исследуемых сортов представлен в таблице 1.

Таблица 1.

Сорта перца, использованные в исследовании

№	Название	№ ВИР	Происхождение	Место регистрации / Год
1	Факел	3847	Россия	Пущин / 2022
2	Горицвет	3851	Россия	Пущин / 2022
3	Зарево	3901	Россия	Пущин / 2022
4	Зорька	3920	Россия	Пущин / 2022
5	Светлана	3921	Россия	Пущин / 2022
6	Луч	3953	Россия	Пущин / 2022
7	Рассвет	4010	Россия	Пущин / 2022
8	Восход	4047	Россия	Пущин / 2022
9	Аврора	4085	Россия	Пущин / 2022
10	Рассвет 2	4110	Россия	Пущин / 2022
11	Заря	4122	Россия	Пущин / 2022
12	Утренняя звезда	4155	Россия	Пущин / 2022
13	Полярная	4190	Россия	Пущин / 2022
14	Арктика	4210	Россия	Пущин / 2022
15	Полярный свет	4215	Россия	Пущин / 2022

Методы исследования

Молекулярно-генетический анализ. Проводилась экстракция ДНК из молодых листьев исследуемых растений. Для амплификации использовались специализированные праймеры серии 25-1 и 25-2, разработанные для идентификации участков генома, потенциально связанных с устойчивостью к возбудителю черной бактериальной пятнистости (*Xanthomonas* spp.).

ПЦР и гель-электрофорез. ПЦР-продукты разделялись в 2 % агарозном геле, окрашивались бромистым

этидием и визуализировались в УФ-свете. Результаты анализировались на наличие специфических ампликонов, которые могут служить молекулярными маркерами устойчивости.

Биоинформатический анализ. Использовались базы данных KEGG и EnsemblPlants для аннотации предполагаемых локусов и их участия в сигнальных путях иммунного ответа.

Статистическая обработка. Анализ амплификационных данных проводился с использованием R. Для оценки различий между сортами использовались методы кластерного анализа и анализа главных компонент (PCA).

Результаты исследования

Молекулярный анализ 15 образцов сладкого перца (*Capsicum annuum* L.) с использованием праймеров серии **25-1** продемонстрировал наличие различий в амплификационных профилях между исследуемыми линиями. Проведённая ПЦР-амплификация позволила оценить присутствие специфических фрагментов ДНК, потенциально ассоциированных с устойчивостью к возбудителю черной бактериальной пятнистости (*Xanthomonas spp.*), что представляет особую ценность в контексте молекулярно-маркерной селекции.

Обнаруженные ампликоны, преимущественно в диапазоне 300–500 п.н., свидетельствуют о наличии консер-

вативных участков в геномах отдельных сортов, предположительно вовлечённых в формирование защитных реакций. Эти результаты коррелируют с данными, представленными в литературе, согласно которым устойчивость к патогенам рода *Xanthomonas* может быть обусловлена действием как доминантных, так и рецессивных генов, обеспечивающих локальный или системный иммунный ответ [4, 6, 16].

На рисунке представлены типичные результаты электрофореза ПЦР-продуктов, полученных при амплификации с использованием праймеров серии 25-1. У ряда образцов (в частности, «Арктика», «Полярный свет», «Рассвет 2») визуализируются чёткие полосы соответствующей длины, что может указывать на наличие целевых локусов. В то же время, у других образцов («Аврора», «Светлана») амплификация либо отсутствовала, либо давала неспецифический профиль, что может быть связано как с отсутствием нужного локуса, так и с мутациями в зонах праймерного связывания.

Полученные данные позволяют выделить два кластера: образцы с положительной амплификацией (предположительно устойчивые) и образцы с отрицательной или слабой амплификацией (предположительно восприимчивые). Эта предварительная классификация нуждается в дальнейшем подтверждении с использованием методов фенотипической оценки и секвенирования ПЦР-продуктов для верификации специфичности полученных фрагментов.

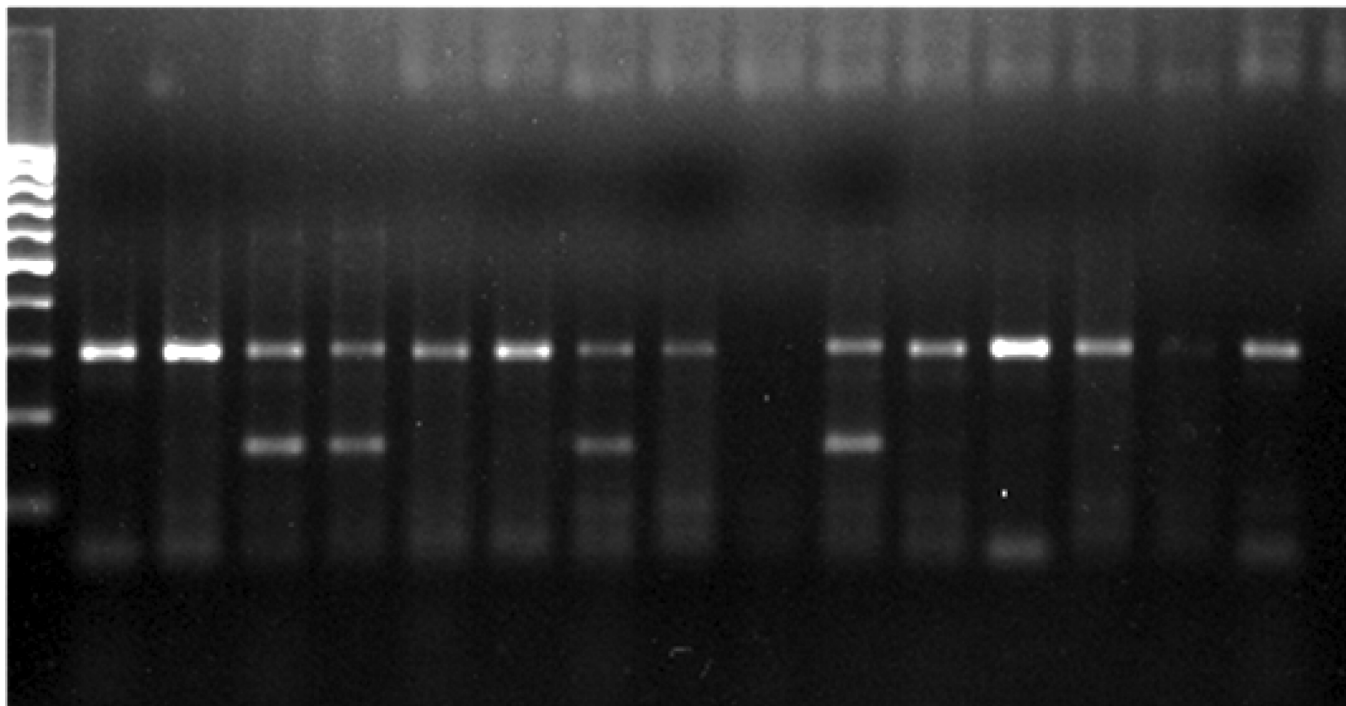


Рис. 1. Результаты ПЦР-амплификации с использованием праймеров серии 25-1 на 15 сортах *Capsicum annuum* L. Маркер — стандарт молекулярной массы 100–1000 п.н.

Таким образом, молекулярные данные, полученные в рамках настоящего исследования, не только демонстрируют эффективность применения праймеров 25-1 в дифференциации образцов, но и закладывают основу для последующего внедрения методик MAS в программы селекции устойчивых сортов перца.

Выводы

В ходе молекулярного анализа 15 сортов *Capsicum annuum* L. с использованием праймеров серии 25-1 были выявлены различия в амплификационных профилях, позволяющие предположить наличие потенциальных локусов устойчивости к возбудителю черной бактериальной пятнистости (*Xanthomonas spp.*). Обнаружение чётких ампликонов у части образцов (в частности, «Арктика», «Полярный свет», «Рассвет 2») позволяет отнести их к потенциально устойчивым формам, что требует

дальнейшего подтверждения фенотипическими методами и секвенированием полученных фрагментов.

Использованная праймерная система показала эффективность для предварительной молекулярной дифференциации исследуемого материала и может быть рекомендована для применения в программах молекулярно-маркерной селекции. Полученные данные формируют основу для разработки набора маркеров, применимых на ранних стадиях отбора, и могут быть использованы для ускорения селекции сортов перца с повышенной устойчивостью к бактериальным патогенам.

Результаты подчёркивают значимость применения комплексного подхода, включающего молекулярно-биологические, биоинформатические и селекционные методы, при изучении механизмов устойчивости культурных растений к фитопатогенам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубина Е.В. ДНК-технологии (молекулярное маркирование) в селекции риса и семеноводстве овощных культур: дис. ... д-ра биол. наук: 06.01.05. — Краснодар, 2019.
2. Дубина Е.В. и др. Создание новых резистентных форм *Oryza sativa* L. к *Magnaporthe grisea* с использованием методов молекулярного маркирования // Молодой учёный. — 2015. — №9.2 (89.2). — С. 15–19.
3. Мухина Ж.М., Дубина Е.В. Молекулярные маркеры и их использование в селекционно-генетических исследованиях // В сб.: ДНК-маркеры в растениеводстве. — 2011.
4. Тоцкий И.В., Гордеева Е.И., Кукоева Т.В. и др. Генетическое разнообразие и антиоксидантный потенциал сортов перца сладкого сибирской селекции // Письма в Вавиловский журнал генетики и селекции. — 2021.
5. Тютёрев В.А., Кузнецова Т.В. Экологически безопасные индукторы устойчивости растений к болезням // Вестник защиты растений. — 2015. — №1.
6. Шестакова А.А., Кузнецов А.В. Стимулирующие рост растений бактерии в регуляции устойчивости растений к стрессовым факторам // Агрохимия. — 2015.
7. Alcantara и др. Ethyl methanesulfonate-induced seed mutagenesis of *Capsicum annuum* // Journal of Heredity. — 1996.
8. Ashrafuzzaman M. et al. Micropropagation of Two Varieties of Bell Pepper (*Capsicum annuum* L.) // International Journal of Agriculture and Biology. — 2009.
9. Bello L.L. et al. Correlation and Path Coefficient Analysis of Yield and Agronomic Characters among Open Pollinated Maize Varieties and Their F1 Hybrids in a Diallel Cross // Plant. — 2010.
10. Bustos R. et al. Somaclonal Variation in Habanero Pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) as Assessed by ISSR Molecular Markers // HortScience. — 2009.
11. Buyukalaca S. Somatic embryogenesis and plant regeneration of pepper in liquid media // Plant Cell Reports. — 1996.
12. Buzzy M. et al. Improvement of In Vitro Proliferation and Elongation of Habanero Pepper by Inhibition of Ethylene Effects // HortScience. — 2006.
13. Buzzy M. et al. In vitro germplasm conservation of Habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) // HortScience. — 2005.
14. Candole B. et al. Resistance of Chili Pepper Cultivars to Isolates of *Phytophthora capsici* // Plant Disease. — 2010.
15. Castillo F. et al. Lipase-catalyzed synthesis of pungent capsaicin analogues // Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic. — 2007.
16. Chandra A. Differentiation of multiple shoot buds and plantlets in cultured embryos of *Capsicum annuum* L. var. Mathania // HortScience. — 1983.
17. Ezura H. Micropropagation of *Capsicum annuum* L. through in vitro culture of hypocotyls // Plant Cell, Tissue and Organ Culture. — 1997.
18. Fari M. Cultivar differences in shoot-forming capacity of hypocotyl tissues of pepper (*Capsicum annuum* L.) // Scientia Horticulturae. — 1986.

© Дубина Елена Викторовна (lenakrug1@rambler.ru); Евтушенко Илья Дмитриевич (klon2200@bk.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА РОСТ И РАЗВИТИЕ ТЕЛЯТ КРАСНО-ПЁСТРОЙ ПОРОДЫ

INFLUENCE OF MINERAL ADDITIVES ON GROWTH AND DEVELOPMENT OF RED-SPOTTED CALVES

**S. Polskikh
V. Gryzlov**

Summary. The article discusses the question of mineral nutrition of red-spotted calves during the period of intensive growth and formation of productive qualities. It analyzes current scientific research concerning the influence of various mineral additives on physiological, biochemical and productive parameters of young cattle. Scientific novelty of the work consists in systematization of data on specificity of mineral metabolism in calves of red-brown breed taking into account their genetic features and productivity potential. The results of the review indicate a positive influence of balanced mineral nutrition on the intensity of growth, bone tissue formation, functional state of the immune system and general resistance of the calf organism. It is established that optimization of macro- and microelements level in the diet promotes increase of average daily weight gain, reduces morbidity and increases safety of young animals.

Keywords: mineral additives, trace elements, red-spotted breed, calves, growth, metabolism, milk period.

Польских Светлана Валерьевна

кандидат биологических наук, доцент,
Воронежский Государственный Аграрный университет
имени Императора Петра I
future29@yandex.ru

Грызлов Валерий Александрович

Воронежский Государственный Аграрный университет
имени Императора Петра I
future29@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема минерального питания телят красно-пестрой породы в период интенсивного роста и формирования продуктивных качеств. Проведен анализ современных научных исследований, посвященных влиянию различных минеральных добавок на физиологические, биохимические и продуктивные параметры молодняка крупного рогатого скота. Научная новизна работы заключается в систематизации данных о специфике минерального обмена у телят красно-пестрой породы с учетом их генетических особенностей и потенциала продуктивности. Результаты обзора свидетельствуют о положительном влиянии сбалансированного минерального питания на интенсивность роста, формирование костной ткани, функциональное состояние иммунной системы и общую резистентность организма телят. Установлено, что оптимизация уровня макро- и микроэлементов в рационе способствует повышению среднесуточных приростов массы, снижает заболеваемость и повышает сохранность молодняка.

Ключевые слова: минеральные добавки, микроэлементы, красно-пестрая порода, телята, прирост, обмен веществ, молочный период.

Введение

Полноценное кормление молодняка крупного рогатого скота необходимо в целях реализации генетического потенциала животных и формирования высокой продуктивности взрослого поголовья. Высокую значимость для растущего организма телят имеет обеспеченность минеральными веществами, которые участвуют во всех физиологических процессах и метаболических реакциях. Оптимальный минеральный состав рациона необходим при интенсивном выращивании телят красно-пестрой породы, отличающихся высокой энергией роста и направленностью обменных процессов на формирование мясной и молочной продуктивности.

Красно-пестрая порода коров была выведена путем скрещивания симментальской и голштинской породы, характеризуется комбинированной продуктивностью,

выраженным молочным типом сложения, высокой интенсивностью роста молодняка, что предъявляет высокие требования к минеральному питанию в ранний постнатальный период. Телята этой породы отличаются активным формированием костной ткани и мышечной массы, а потому особенно чувствительны к дефициту минеральных веществ. Недостаточное поступление макро- и микроэлементов может стать лимитирующим фактором, сдерживающим реализацию генетического потенциала животных.

Современные системы выращивания молодняка крупного рогатого скота предусматривают использование различных минеральных добавок, обеспечивающих организм животных необходимыми питательными веществами. Однако вопросы оптимизации минерального питания телят красно-пестрой породы с учетом их физиологических особенностей требуют дальнейшей научной проработки.

Роль минеральных веществ в организме телят

Минеральные вещества являются незаменимыми компонентами питания телят и выполняют структурные, регуляторные, каталитические функции в организме. Телята в период интенсивного роста особенно чувствительны к недостатку минеральных веществ, что обусловлено активным формированием скелета, внутренних органов и систем организма. Недостаточное поступление минеральных элементов с кормом вызывает характерные клинические признаки: животные начинают поедать грязную подстилку, грызть посторонние предметы, облизывать друг друга, наблюдается отставание в росте и развитие анемии.

Кальций, фосфор, магний, фтор, кремний и сера являются структурными компонентами тканей и участвуют в формировании костной системы. Натрий, калий, хлор, кальций и магний поддерживают осмотическое давление тканей и тканевых жидкостей, обеспечивают нормальное функционирование клеток. Железо, кобальт, цинк, марганец и селен регулируют секрецию ферментов и гормонов, оказывают влияние на все метаболические процессы в организме. Особенно важен для телят молочного периода баланс кальция и фосфора, который определяет интенсивность роста костной ткани и формирование крепкого костяка.

Исследования показывают, что при нехватке минералов в организме телят снижается эффективность усвоения витаминов [1]. Так, витамин Е проявляет синергизм с селеном, и недостаток последнего значительно ухудшает антиоксидантную защиту организма. Соответственно, существует необходимость разработанного подхода к обеспечению телят всеми необходимыми питательными веществами.

Особенности минерального обмена у телят красно-пестрой породы

Телята красно-пестрой породы отличаются высокой интенсивностью роста и специфическими особенностями минерального обмена, обусловленными генетическими характеристиками породы. Благодаря наличию голштинской крови, телята красно-пестрой породы демонстрируют усиленное формирование костной системы в первые месяцы жизни, поэтому им необходимо повышенное поступление кальция и фосфора с рационом.

Кальций является одним из основных минеральных элементов, необходимых для роста и развития телят. Он участвует в формировании костной ткани, свертывании крови, мышечном сокращении и нервной проводимости. У телят потребность в кальции особенно высока в первые месяцы жизни, когда происходит интенсивный

рост скелета. Недостаток кальция приводит к нарушению процессов оссификации, развитию рахита и деформации костей.

Фосфор играет роль в энергетическом обмене, является компонентом АТФ и участвует в процессах фосфорилирования. Он также необходим для нормального развития ЦНС, формирования костной ткани и функционирования буферных систем крови. Дефицит фосфора у телят проявляется задержкой роста, искривлением конечностей, снижением аппетита. При среднесуточном приросте 500 и 750 г потребность телят в кальции и фосфоре должна составлять соответственно 9,6 и 14 г, 6,2 и 9,0 г на голову в сутки [15].

Экспериментальные исследования показывают, что при обогащении рациона телят фитодобавками происходит улучшение усвоения кальция и фосфора. Так, применение фитодобавки из эспарцета песчаного в количестве 0,300 кг на голову в сутки позволило увеличить отложение кальция в организме телят на 1,87 г, фосфора — на 1,75 г по сравнению с контрольной группой [18]. Использование растительных компонентов можно рассматривать как перспективное направление для оптимизации минерального обмена у телят.

Влияние минеральных добавок на рост и развитие телят

Исследования, проведенные на телятах молочного периода выращивания, демонстрируют прямую зависимость между обеспеченностью рациона минеральными веществами и интенсивностью роста животных. При включении в рацион телят комплексных минеральных добавок отмечается увеличение среднесуточных приростов живой массы, улучшение конверсии корма, повышение экономической эффективности выращивания [5, 7, 13].

Значение имеет обеспеченность организма телят микроэлементами, в частности, медь, цинк, марганец, кобальт, йод, селен. Эти элементы входят в состав многих ферментов и гормонов, регулирующих интенсивность метаболических процессов.

Современные исследования показывают, что эффективность минеральных добавок повышается при их комплексном применении с пребиотиками и антиоксидантами. Так, введение в рацион телят до 4-месячного возраста водорастворимого арабиногалактана (пребиотика) в дозе 75 мг/кг и дигидрокверцетина (антиоксиданта) способствует формированию продуктивного здоровья и профилактике желудочно-кишечных и бронхо-легочных заболеваний [20, 21].

Практика применения минеральных добавок в рационах телят красно-пестрой породы

Наиболее распространенной формой введения минеральных веществ в рацион являются премиксы и специализированные добавки, которые должны содержать все необходимые животным элементы в оптимальных соотношениях. В особенности учитывается соотношение кальция и фосфора, которое для телят молочного периода должно составлять 1,5–2:1 [10, 23].

При выращивании телят красно-пестрой породы следует учитывать, что потребность в минеральных веществах изменяется с возрастом и зависит от интенсивности роста. В первые дни жизни теленка получают необходимые минералы с молозивом и молоком матери, но уже через несколько дней после рождения может потребоваться дополнительное введение калия, кальция и фосфора [8]. По мере роста теленка и увеличения потребления растительных кормов возрастает потребность в микроэлементах, особенно в меди, цинке и марганце [11].

Для оптимизации минерального питания телят красно-пестрой породы рекомендуется использовать комплексный подход, включающий:

1. Балансирование основного рациона по содержанию макро- и микроэлементов [3];
2. Применение витаминно-минеральных премиксов с учетом возраста и физиологического состояния животных [16];
3. Использование органических форм микроэлементов, обладающих повышенной биодоступностью [19];
4. Контроль полноценности минерального питания на основе биохимических показателей крови и клинического состояния телят.

Эффективность использования различных форм минеральных добавок

Современный рынок предлагает широкий ассортимент минеральных добавок, различающихся по химическому составу, физической форме и биологической доступности.

Традиционно в животноводстве используются неорганические соли микроэлементов (оксиды, сульфаты, хлориды и карбонаты), но их биодоступность ограничена из-за антагонистических взаимодействий в желудочно-кишечном тракте. В последние годы все большее распространение получают органические формы микроэлементов — хелатные соединения [14], протеинаты [22], глицинаты [17] и другие комплексы микроэлементов с аминокислотами и пептидами. Эти соединения характеризуются повышенной биодоступностью и эффективностью при более низких дозах введения.

Исследования показывают, что использование органических форм минеральных веществ позволяет снизить их дозировку в рационе по сравнению с неорганическими солями при сохранении того же биологического эффекта [9]. В частности, применение хелатной формы цинка способствует оптимизации абсорбции этого микроэлемента в кишечнике. Высокая биодоступность цинка в хелатном комплексе позволяет достичь необходимого уровня потребления при относительно низких дозировках, что позволяет снизить общее содержание цинка в кормовых рационах [4]. Это особенно важно для телят красно-пестрой породы, отличающихся интенсивным ростом и высокими требованиями к качеству минерального питания.

Перспективным направлением является применение наноразмерных форм минеральных веществ, отличающихся высокой биологической активностью. Благодаря достижениям в области нанотехнологий стало возможным создание кормовых добавок и препаратов, содержащих высокоактивные компоненты в наноразмерном состоянии. «Кальций-МАКГ» представляет собой один из примеров подобных продуктов. Уменьшение размера частиц до наноуровня существенно увеличивает площадь их поверхности и контакт с биологическими структурами, что повышает эффективность усвоения минералов организмом телят [6].

Минеральное питание телят и формирование иммунитета

Цинк является необходимым компонентом более 200 металлоферментов и участвует в синтезе нуклеиновых кислот и белков, определяет интенсивность пролиферации лимфоцитов и продукцию цитокинов. Дефицит цинка приводит к атрофии тимуса, снижению числа лимфоцитов, угнетению иммунного ответа у телят [12].

Медь участвует в процессах кроветворения, защите клеток от окислительного стресса и синтезе соединительной ткани. Недостаток меди в рационе телят вызывает анемию, снижение фагоцитарной активности нейтрофилов, повышенную восприимчивость к инфекционным заболеваниям [24].

Селен является антиоксидантом, защищает клеточные мембраны от перекисного окисления, поддерживает функциональную активность иммунокомпетентных клеток. При дефиците селена в организме телят наблюдается снижение синтеза антител, угнетение клеточного иммунитета, повышенная предрасположенность к респираторным заболеваниям. Введение дрожжей, обогащенных селеном, в рационы телят позволяет повысить среднесуточные приросты массы, улучшает биохимические показатели крови, увеличивает количество бифидо- и лактобактерий в содержимом толстого отдела кишечника [2].

Обеспечение телят красно-пестрой породы оптимальным количеством цинка, меди, селена и других иммуномодулирующих микроэлементов способствует формированию полноценного иммунитета, снижению заболеваемости и повышению сохранности молодняка. Особенно важно это в условиях промышленного выращивания, для которого характерна высокая концентрация поголовья и повышенная микробная нагрузка.

Заключение

Проведенный анализ научной литературы по вопросам минерального питания телят красно-пестрой породы позволяет сделать вывод о фундаментальной роли макро- и микроэлементов в обеспечении нормального роста и развития молодняка. Минеральные вещества участвуют во всех физиологических и биохимических процессах организма, определяют интенсивность роста, формирование костной и мышечной ткани, функциональное состояние внутренних органов и иммунной системы.

Телята красно-пестрой породы предъявляют повышенные требования к полноценности минерального

питания, особенно в первые месяцы жизни. Недостаток минеральных веществ в этот период приводит к необратимым нарушениям развития и снижению будущей продуктивности животных.

Современные подходы к оптимизации минерального питания телят предусматривают использование комплексных минеральных добавок с высокой биологической доступностью, применение органических форм микроэлементов, контроль полноценности питания на основе биохимических и зоотехнических показателей. Перспективным направлением является разработка адресных премиксов с учетом генетических особенностей породы, условий содержания, направления продуктивности.

Результаты научных исследований свидетельствуют о том, что сбалансированное минеральное питание телят красно-пестрой породы позволяет реализовать их генетический потенциал, повысить резистентность организма, снизить заболеваемость, улучшить экономические показатели выращивания молодняка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брыло И.В. и др. Эффективность использования эссенциальных минеральных элементов и витаминов в кормлении крупного рогатого скота и молочных коз. — 2023.
2. Ганущенко О.Ф., Болткова Е.А. Эффективность использования новой селенсодержащей добавки в кормлении телят. — 2024.
3. Гридин В.Ф. Балансирование рационов сухостойных коров разработанным премиксом и его влияние на последующую молочную продуктивность // Актуальные проблемы экологии и природопользования: сборник. — 2023. — С. 115.
4. Измайлов Е. Органические формы микроэлементов. Тема не теряет актуальности! // Эффективное животноводство. — 2021. — №. 9 (175). — С. 13.
5. Калужный И.И. и др. Эффективность использования нового способа оптимизации микроминерального питания телят // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2023. — №. 11 (229). — С. 70–76.
6. Кислякова Е.М. Интенсификация производства молока на основе прогрессивных приемов кормления коров в условиях Удмуртской Республики. — 2020.
7. Комкова Е.А. Влияние комплексонов микроэлементов на физиолого-биохимические показатели крови и продуктивность выращиваемых телят: дис. — Белгородская государственная сельскохозяйственная академия, 2009.
8. Красочко П.А. и др. Содержание микро- и макроэлементов в крови и покровном волосе телят // Зоотехническая наука Беларуси. — 2010. — Т. 45. — №. 1. — С. 207–212.
9. Крюков В.С. и др. Особенности действия органических и неорганических источников микроэлементов в питании животных (обзор) // Проблемы биологии продуктивных животных. — 2020. — №. 3. — С. 27–54.
10. Кузнецов С.Г. Минеральное питание и критерии обеспеченности животных минеральными веществами: Обзор // Сельское хозяйство за рубежом. Серия животноводство. — 1976. — №. 5. — С. 33–38.
11. Ламанд Г. Недостаток микроэлементов в кормлении телят // Farm Animals. — 2013. — №. 3–4. — С. 84–90.
12. Лобков В.Ю., Клетикова Л.В., Фролов А.И. Цинк в рационах телят // Аграрный вестник Верхневолжья. — 2019. — №. 3. — С. 53–60.
13. Машкина Е.И., Степаненко Е.С. Влияние витаминно-минерального питания на развитие телят-молочников // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2017. — №. 3 (149). — С. 111–115.
14. Понько Д.С. и др. Перспективы применения хелатов в кормлении сельскохозяйственных животных // Теория и практика современной аграрной науки. — 2022. — С. 905–909.
15. Ракецкий и др. Использование энергии корма бычками при балансировании рационов с скардой и минерально-витаминной добавкой // Тракторы, автомобили, мобильные энергетические средства: проблемы и перспективы развития: доклады междунар. науч.-практ. конф. — Минск, 2009. — С. 209–214.
16. Рахимжанова И.А., Галиев Б.Х., Ширнина Н.М. Использование БВМД с включением белковых кормов животного происхождения при выращивании подсосных телят // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. — 2016. — №. 5 (61). — С. 101–102.
17. Серяков И.С. и др. Эффективность замены минеральной формы цинка на органическую в рационах молодняка крупного рогатого скота // Сельское хозяйство и экосистемы в современном мире: региональные и межстрановые исследования. — 2024. — Т. 3. — №. 4. — С. 29–36.

18. Суханова Е.В., Сычёва Л.В., Морозков Н.А. Эффективность скармливания фитодобавки при выращивании телят // Известия ОГАУ. 2022. №2 (94).
19. Туаева Е.В., Краснощекова Т.А., Саитов П.А. Использование хелатных форм микроэлементов в кормлении молодняка крупного рогатого скота в условиях Амурской области // Проблемы зоотехнии, ветеринарии и биологии животных. — 2019. — С. 122–130.
20. Фомичев Ю.П. Повышение жизнеспособности телят в период выращивания путем добавления в рацион биоэлементного комплекса, антиоксиданта и пребиотика // Молочное и мясное скотоводство. — 2022. — №. 1. — С. 46.
21. Фомичев Ю.П., Спинул А.И. Влияние антиоксиданта, пребиотика и биоэлементного комплекса на резистентность и микробиоценоз толстой кишки телят // Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии. — 2015. — №. 2. — С. 155–158.
22. Фролов А.И., Филиппова О.Б. Эффективность применения протеината цинка в рационах телят // Техника и технологии в животноводстве. — 2019. — №. 4 (36). — С. 46–50.
23. Шмаков, П.Ф. Повышение полноценности кормления, переваривания и усвоения питательных веществ рационов сельскохозяйственными животными
24. Якимов Д.Н. Влияние добавок хрома и меди на воспроизводительные качества коров. — ЗАО «Университетская книга». Конференция: проблемы развития современного общества, Курск, 23–24 января 2024 года Организаторы: Курская региональная общественная организация Общероссийской общественной организации «Вольное экономическое общество России», Северо-Кавказский федеральный университет, Совет молодых ученых и специалистов Курской области, 2024.

© Польских Светлана Валерьевна (future29@yandex.ru); Грызлов Валерий Александрович (future29@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВЛИЯНИЕ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ПОЧВЕННЫЙ И ЛИСТВЕННЫЙ ПОКРОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ГОРОДА ТЮМЕНИ

INFLUENCE OF ANTHROPOGENIC LOAD ON SOIL AND FOLIAGE COVER IN THE CENTRAL PART OF TYMEN CITY

**O. Sumenkova
S. Guzeeva
E. Zhilyakov
A. Oznobikhina**

Summary. The modern process of urbanization leads to an increase in the anthropogenic load, which affects the quality of the urban environment. The process of urbanization is accompanied by an increase in the number of cars per capita. The increasing traffic load in modern cities affects the ecological state of the components of the natural environment, especially the state of the soil cover. Urban soils are one of the significant components of the urban environment, as they can adsorb pollutants in their profile. The purpose of the study was to analyze the content of petroleum products in soil and deciduous samples taken in the central part of the city of Tyumen in areas with increased traffic load. The leading research method is empirical, by comparing the indicators of soil samples with each other and searching for interdependencies. The study revealed that the level of petroleum products in urban soils and leaves increases depending on the increase in the level of transport load. At the same time, it was noted that areas with large green areas had a lower content of petroleum products at the same level of transport load. These results will allow for more efficient planning of the landscaping process in areas with increased traffic load to create a comfortable urban environment in cities.

Keywords: urban environment quality, traffic load, soil cover, foliage cover.

Суменкова Ольга Андреевна

Аспирант, Тюменский Индустриальный Университет

Sumenkova_1998@mail.ru

Гузеева Светлана Анатольевна

Кандидат биологических наук, доцент,
Тюменский Индустриальный Университет

guzevasa@tyuiu.ru

Жиляков Евгений Викторович

Доктор медицинских наук, профессор,
Тюменский Индустриальный Университет

Evnasoo@yandex.ru

Ознобихина Анастасия Олеговна

Кандидат биологических наук, доцент,
Тюменский Индустриальный Университет

oznobihinaao@TYUIU.ru

Аннотация. Современный процесс урбанизации приводит к росту техногенной нагрузки, что отражается на качестве городской среды. Процесс урбанизации сопровождается ростом количества автомобилей на душу населения. Рост транспортной нагрузки в современных городах влияет на экологическое состояние таких компонентов природной среды, как почвенный покров и растительность, произрастающая на нем. Урбаноземы является одним из значимых компонентов городской природной среды, так как способны адсорбировать в своем профиле загрязняющие вещества. Целью исследования было провести анализ содержания нефтепродуктов в почвенных и листовых образцах, отобранных в центральной части города Тюмени на участках, с повышенной транспортной нагрузкой. Ведущим методом исследования является эмпирический, путем сравнения показателей почвенных проб между собой и поиском взаимосвязей. В рамках исследования выявлено, что уровень содержания нефтепродуктов в городских почвах и листьях увеличивается в зависимости от повышения уровня транспортной нагрузки. При этом было отмечено, что участки с большими зелёными зонами имели меньший показатель содержания нефтепродуктов при одинаковом уровне транспортной нагрузки. Данные результаты позволят более эффективно планировать процесс озеленения на участках с повышенной транспортной нагрузкой для создания комфортной городской среды в городах.

Ключевые слова: качество городской среды, транспортная нагрузка, почвенный покров, лиственный покров.

Введение

За последние десятилетия в России наблюдается устойчивая тенденция к увеличению доли городского населения. Этот процесс сопровождается ростом интенсивности движения транспорта в городах, что оказывает негативное влияние на экологическую

безопасность и качество жизни в городской среде [1]. Под качеством жизни в городах чаще всего понимается возможность комфортного пребывания в городах. Увеличение техногенной нагрузки от автотранспорта приводит к угнетению состояния компонентов природной среды, в особенности почвенного покрова и растений [2,3,4]. Это связано с тем, что данные компоненты могут

Предварительно была составлена карта отбора проб в центральной части города Тюмени, с использованием современных цифровых карт (рис. 1).

Отбор проб почвы на участках производился методом конверта. На исследуемой площадке специальным совком и почвенным мешком отбирались образцы почв из четырех точек по краям и одной точки в центре. Далее почву перемешивали и проводили исследования для конкретного участка.

Определение содержания нефтепродуктов в городской почве проводили согласно методическим указаниям ПНДФ 16.1:2.21-98. Анализ проб почвы на содержание нефтепродуктов проводился с помощью анализатора жидкости «Флюорат-02-2М», флуометрическим методом для измерения массовой доли нефтепродуктов в отобранном почвенном покрове.

После получения результатов по отобраным образцам почвы производился анализ факторов, которые потенциально могут оказывать влияние на полученные результаты. Выявлялась взаимозависимость, данные интерпретировались и заносились в общую таблицу, представленную ниже.

Лиственные образцы отбирались методом конверта — из четырех точек по краям исследуемого участка и одной точки в центре. В каждой точке было выбрано древесное растение для отбора проб. С каждого древесного растения было отобрано 5 проб, листья собирались с высоты 1,5–2 м для минимизации влияния пыли и других внешних факторов. Таким образом, на каждом участке исследования было отобрано 25 проб листовых образцов. Для исследования были выбраны листья деревьев и кустарников, наиболее распространенных в городской среде Тюмени: тополь (*Populus*), берёза (*Betula*), сирень (*Syringa vulgaris*) и клён (*Acer*). Содержание нефтепродуктов в листьях определялось методом газовой хроматографии с масс-спектрометрией (ГХ-МС) после экстракции гексаном. Полученные данные сравнивались с результатами анализа почвенных проб для выявления корреляции между уровнем загрязнения почвы и уровнем загрязнения листового покрова.

Методологический подход соответствует целям исследования и позволяет достигнуть реализацию задач, поставленных в ходе исследования.

Результаты и обсуждение

После проведения лабораторных исследований и анализа данных были получены следующие результаты для проб почвы (см. табл. 1).

Для сравнения содержания нефтепродуктов в почвенных пробах, взятых на участках исследования, с эта-

лонным образцом, была построена диаграмма, основанная на результатах анализа (рис.2).

Отмечалось, что на участках с близкой транспортной нагрузкой, показатель загрязнения варьировался в зависимости от плотности озеленения на участке. На участках с парковочными зонами, долгими светофорами концентрация веществ была больше, чем на аналогичных участках, на основании этих данных был составлен график (рис.3). По результатам исследования, отмечалось, что чем выше плотность озеленения исследуемых участков нефтепродуктов, тем ниже зависимость между уровнем транспортной нагрузки и содержанием в почве.

Содержание нефтепродуктов в почве зависит от множества факторов. Одним из значимых факторов является уровень транспортной нагрузки. По результатам исследования выявлено, что содержание нефтепродуктов в почве на разных участках варьируется в среднем от 1000 до 5000 мг/кг. При сравнении с эталонной пробой № 15, отобранной в лесном парке «Экопарк Затюменский», по многим пробам отмечается превышение содержания нефтепродуктов на 1 кг образца в два и более раз. Такая вариация обусловлена уровнем загруженности автотранспорта в центральной части города Тюмени, при этом максимальное значение от транспортной нагрузки на исследуемых участках составляло 33000 в сутки. Необходимо отметить, что показатель загруженности определялся путем сложения всех транспортных потоков, прилегающих к точке отбора почвенной пробы.

На основании постановления администрации города Тюмени, опубликованного в 2023 году, средняя фоновая концентрация нефтепродуктов в почве для Тюмени составляет 40 мг/кг [9]. Полученные нами данные в результате исследования центральной части города Тюмени превышают в несколько фоновое значение. Это свидетельствует о накоплении в почве нефтепродуктов в зонах активной транспортной нагрузки.

Наши исследования были сосредоточены на почвенном покрове как на важном элементе природной среды. Выбор обусловлен способностью почвы аккумулировать загрязняющие вещества, поступающие в результате техногенного воздействия. Почва представляет собой сложную систему, в которой запускаются ключевые биогеохимические циклы, определяющие функционирование экосистемы. Деградация почвенных процессов может привести к нарушению экологического равновесия.

В дополнение к исследованию почвенного покрова были проведены анализы листьев растений, произрастающих на тех же участках, где отбирались почвенные пробы. Поскольку накопление загрязнений в листовых образцах может свидетельствовать о степени загрязнения природной среды. Важно отметить, что не на

Таблица 1.

Результаты исследования почвенного покрова в Центральной части города Тюмени

№ точки отбора	Описание места отбора проб в г. Тюмени	Нефтепродукты, мг/кг	Показатель плотности озеленения	Максимальная транспортная нагрузка, маш. /сутки
1	Зона активного транспортного движения, на данном участке часто затруднено движение из-за большого потока машин. Рядом с участком есть зелёная зона, представленная виде сквера.	3996	1500	32400
2	Зона активного транспортного движения между двумя частями города, разделенной ЖД дорогой. На участке имеется автомобильная развязка в виде моста и прилегающая рядом ЖД дорога.	4081,5	2000	33000
3	Пересечение двух крупных улиц, в зелёной зоне, прилегающей к жилому дому.	2778	1500	28800
4	Зона активного транспортного движения, рядом с кольцом, на данном участке часто затруднено движение из-за большого потока машин.	4099,5	1500	33000
5	Зона активного транспортного движения.	2088	1500	27600
6	Зона неактивного транспортного движения. Однако на рядом с данным участком имела большая парковочная зона.	2079	1500	8400
7	Зона активного транспортного потока, в будни на участке движение затруднено из-за потока машин с Заречной части города в Центральную.	2367	500	21600
8	Зона разделения активного транспортного потока на 2 направления, в Заречную и Центральную часть города.	3087	1000	26400
9	Зона активного транспортного потока, также рядом имеется большая парковочная зона для рядом находящихся офисных и жилых зданий.	3615	500	24000
10	Зона активного транспортного потока с Центральной части города в Заречную, при этом на участке имеется несколько потоков. Проба отобрана чуть ближе к жилой зоне.	3120,5	10	28800
11	Зона среднего транспортного потока, однако в будни на участке часто возникают пробки из-за рядом расположенных высоких офисных зданий.	2160	500	18000
12	Сквер, расположенный в центральной части города, окруженный активными транспортными потоками.	2543	4000	24000
13	Зона активного транспортного потока, между двумя полосами движения активных транспортных потоков.	3456	1000	31200
14	Зона активного транспортного потока, имеет на участке развязку, направляющую активные транспортные потоки в разные части города.	5018,6	500	33000
15	Экопарк Затюменский (фон, эталонная проба)	1131	8500	0

всех участках были лиственные растения для отбора проб, на некоторых участках был только травянистый, что не даёт возможность корректного сравнения. Следовательно, анализ результатов и корреляция между почвенными и лиственными образцами производилась на основании отобранных лиственных образцов (табл. 2).

В результате исследования нами была выявлена прямая корреляция между содержанием нефтепродуктов в почве и листьях растений (коэффициент корреляции

Пирсона $r = 0.89$, $p < 0.01$). Чем больше уровень содержания нефтепродуктов в почве, тем больше уровень содержания нефтепродуктов отмечался в лиственных образцах, что видно из представленной выше таблицы. Это свидетельствует о том, что растения аккумулируют нефтепродукты из почвы, а их листья могут служить биоиндикаторами загрязнения окружающей среды.

На участках с высокой транспортной нагрузкой (точки отбора 1, 2, 4) содержание нефтепродуктов в листьях

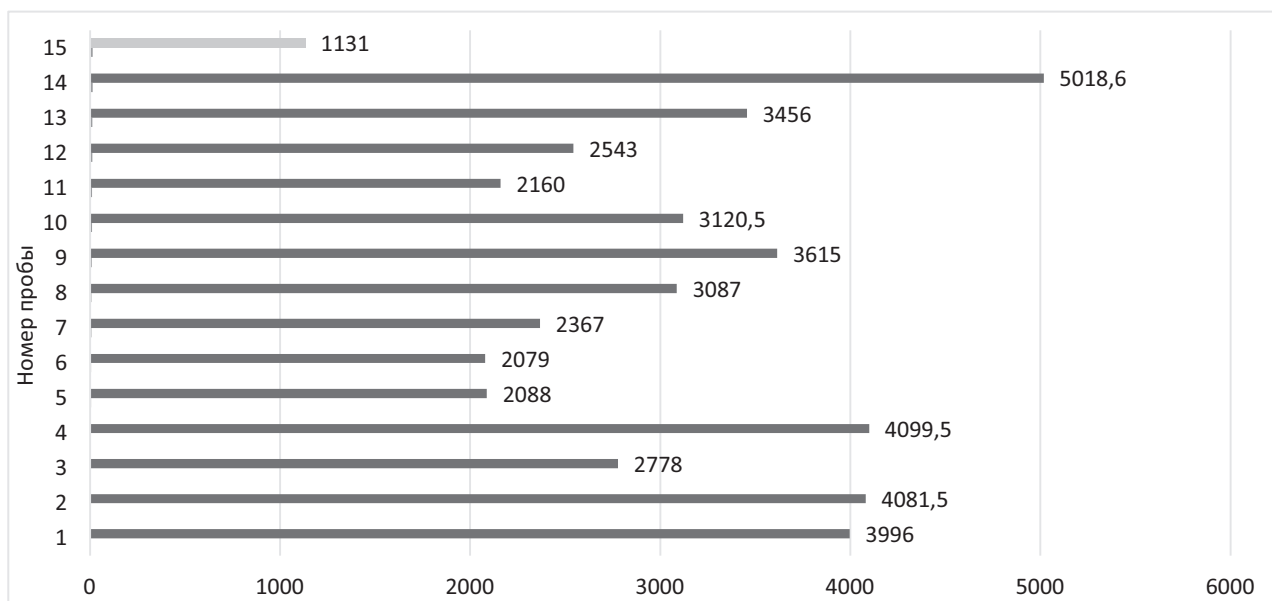


Рис. 2. Содержание нефтепродуктов в почве исследуемых участков, мг/кг

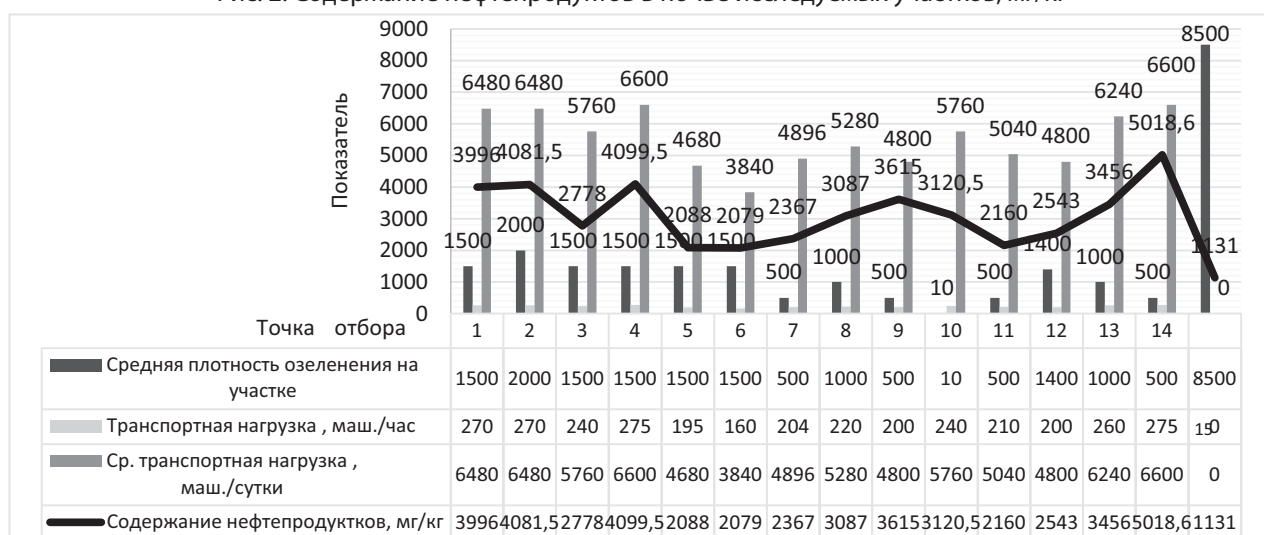


Рис. 3. Общие результаты исследования, с учётом химического загрязнения почвы, уровня транспортной нагрузки и плотности озеленения

было максимальным (45–50 мг/кг), что соответствует высоким показателям в почве (4000–4100 мг/кг). В зонах с умеренной транспортной нагрузкой (пробы 3, 5, 6) содержание нефтепродуктов в листьях снижалось до 25–32 мг/кг. В эталонной пробе (Экопарк Затюменский) показатели были минимальными (12, 4 мг/кг), что подтверждает влияние антропогенной нагрузки на загрязнение, поскольку в случае отсутствия антропогенной нагрузки в виде автотранспорта значение загрязнений по почве и листовым образцам было минимальное.

Результаты исследований, проведенных в других городах, согласуются с данными о негативном влиянии автотранспорта на окружающую среду. В частности,

было установлено, что автотранспорт способствует накоплению различных веществ, включая нефтепродукты, в почве, листьях и других природных компонентах [10]. Результаты исследований указывают на потенциал озеленения в снижении концентрации загрязняющих веществ на территориях. Это подчеркивает значимость зелёных зон для поддержания экологического баланса в городской среде, поскольку они способствуют более равномерному распределению антропогенной нагрузки и активизации естественных механизмов самоочищения, что в конечном итоге минимизирует негативное воздействие на окружающую среду. Сохранение экологического баланса в городах — насущная проблема. Если не предпринимать никаких мер, деградация при-

Таблица 2.
Содержание нефтепродуктов в листьях растений
и почве на исследуемых участках

№ пробы	Нефтепродукты в почве, мг/кг	Нефтепродукты в листьях, мг/кг	Вид растения
1	3996	45,2	Тополь, Берёза
2	4081.5	48,7	Берёза, сирень, тополь
3	2778	32,1	Клён, Берёза
4	4099.5	49,5	Берёза, сирень, тополь
5	2088	25,3	Берёза
6	2079	24,8	Тополь, Берёза
12	2543	28,6	Тополь, Берёза
15	1131	12,4	Берёза сирень, тополь, клён

родной среды может привести к тому, что города станут непригодными для комфортной и здоровой жизни [11, 12, 13]. В связи с этим, крайне важно проводить оценку состояния компонентов природной среды в городах и разрабатывать эффективные стратегии для улучшения экологической обстановки.

Транспортная нагрузка является источником загрязнения, приводящего к образованию вредных веществ.

Эти вещества, попадая в окружающую среду, оседают на листьях, а затем переносятся в почву, где происходит их накопление. Поскольку количество автомобилей продолжает расти, увеличивается и объем выбросов, что усиливает техногенное давление на окружающую среду. Увеличение плотности озеленения может смягчить негативные последствия транспортного загрязнения и способствовать поддержанию экологического равновесия.

Выводы

Выявлена прямая зависимость показателей уровня транспортной нагрузки и показателей содержания нефтепродуктов в почве. Выявлена зависимость между содержанием нефтепродуктов в почве и листовых образцах. Выявлена также обратная зависимость для показателей нефтепродуктов в почве при техногенной нагрузке и достаточной плотности озеленения на участке.

Выявленная взаимосвязь между интенсивностью движения транспорта, плотностью озеленения и уровнем загрязнения нефтепродуктами компонентов окружающей среды позволяет более эффективно планировать создание зелёных зон. Это, в свою очередь, способствует формированию комфортной городской среды и подчеркивает необходимость активного участия горожан в создании качественного озеленения для поддержания экологического равновесия и сохранения здоровья населения.

ЛИТЕРАТУРА

- Аксёнов К.Э. Городские режимы и общественно значимые проекты трансформации городской среды в Российской Федерации / К.Э. Аксёнов, К.А. Галустов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. — 2023. — № 68. — С. 4–28.
- Горелова Ю.Р. Ландшафтная составляющая образа Омска / Ю.Р. Горелова, Н.В. Высоцкая // История и современность. — 2021. — № 1. — С. 49.
- Демиденко Г.А. Оценка состояния древесных растений объектов озеленения города Красноярска / Г.А. Демиденко // Вестник бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. — 2021. — № 1. — С. 109–115.
- Дьячкова О.Н. Принципы стратегического планирования развития «зеленой» инфраструктуры городской среды / О.Н. Дьячкова // ВЕСТНИК МГСУ. — 2021. — Т. 16, № 8. — С. 1045–1064.
- Евтушкова Е.П. Социо-эколого-экономические аспекты устойчивого развития территории / Е.П. Евтушкова // Московский экономический журнал. — 2021. — № 8. — С. 15–23.
- Ивлиева А.Ю. Ландшафтная архитектура и градостроительство / А.Ю. Ивлиева // Наука и образование. — 2021. — Т. 4, № 1. — С. 15–23.
- Капри Ф. На пути к правовой системе в гармонии с природой и обществом / Ф. Капри, У. Маттеи // Экология права. — Москва: Издательство Института Гайдара, 2021. — С. 328.
- Нотман О.В. Индексный метод оценки качества городской среды: международный и российский опыт / О.В. Нотман // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия «Регионоведение: философия, история, социология, юриспруденция, политология, культурология». — 2021. — № 2. — С. 89–99.
- Об утверждении комплексной схемы организации дорожного движения города Тюмени до 2033 года // Постановление администрации города Тюмени: сайт. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/550317103> (дата обращения: 15.04.2024)
- Остапенко М.С. Актуальные проблемы реализации проектов развития территории города (на примере Ростова-на-Дону) / М.С. Остапенко // Российские регионы в фокусе перемен: сборник докладов. — 2022. — Т. 2, № 1. — С. 312–314.
- Соколова С.В. Зарубежный опыт благоустройства и озеленения в крупнейших городах мира / С.В. Соколова // Градостроительное право. — 2022. — № 2. — С. 17–19.
- Цорик А.А. Архитектурно-художественная идентичность природных территорий в городской среде / А.А. Цорик // Приволжский научный журнал. — 2021. — № 3. — С. 149–154.
- Черешнев И.В. Формирование комфортной городской среды: к вопросу об оценке проектов благоустройства / И.В. Черешнев, Н.В. Черешнева, Е.Д. Кусков // Вестник Волгоградского архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2022. — № 86. — С. 338–347.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ, В ТОМ ЧИСЛЕ КРАСИТЕЛЕЙ, СОРБЕНТАМИ, ПОЛУЧАЕМЫМИ ИЗ ОТХОДОВ ЛЬНОПЕРЕРАБОТКИ

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF SORPTION WASTEWATER TREATMENT FROM ORGANIC POLLUTANTS, INCLUDING DYES, WITH SORBENTS OBTAINED FROM FLAX PROCESSING WASTE

M. Uvarov

Summary. With increasing production capacity, the impact of human activities on ecosystems increases. Water resources are becoming one of the vulnerable components of the environment. Pollution of water bodies leads to the death of aquatic organisms. Natural resources are used as the basis of sorption materials used for wastewater treatment. The research topic related to wastewater treatment is relevant. The purpose of this work is to analyze foreign and domestic publications on the sorption of pollutants, including dyes from wastewater, from primary flax processing waste. Flax processing waste includes tow, bonfire and short fiber. The performed analytical review allows us to conclude that sorption materials, including fibrous ones, which are waste from the primary processing of flax, can be used in wastewater treatment from such dyes as Alazarin Red S, C.I. Direct Red 81 and Reactive Red 228.

Keywords: wastewater, pollutant, dye, sorption, sorbent, flax fiber.

Уваров Максим Михайлович

Аспирант, ФГБОУ ВО «Российский государственный
университет им. А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство), г. Москва
uvarov_maxim@rambler.ru

Аннотация. С увеличением производственных мощностей усиливается воздействие человеческой деятельности на экосистемы. Одним из уязвимых компонентов окружающей среды становятся водные ресурсы. Загрязнение водоёмов приводит к гибели гидробионтов. В качестве основы сорбционных материалов, используемых для очистки сточных вод, применяются природные ресурсы. Тема исследования, связанная с очисткой сточных вод, является актуальной. Целью данной работы является анализ зарубежных и отечественных публикаций, посвящённых сорбции загрязняющих веществ, в том числе красителей из сточных вод, отходами первичной переработки льна. К отходам льнопереработки относятся пакля, костра и короткое волокно. Выполненный аналитический обзор позволяет сделать вывод о том, что сорбционные материалы, в том числе волокнистые, являющиеся отходами первичной переработки льна могут применяться в очистке сточных вод от таких красителей как Alazarin Red S, C.I. Direct Red 81 и Reactive Red 228.

Ключевые слова: сточные воды, загрязнитель, краситель, сорбция, сорбент, льноволокно.

Введение

В настоящее время в мире, в том числе в Российской Федерации, происходит процесс активного промышленного развития во всех отраслях. Такие производства как лакокрасочное, химическое, текстильное, пищевое, кожевенное, фармацевтическое, целлюлозно-бумажное, отделочно-красильное и нефтепереработка тесно связаны с внедрением новых технологических линий, циклов, применением различного рода новых поверхностно-активных веществ, красителей, в том числе органических, вспомогательных агентов и реагентов.

В результате хозяйственной деятельности человека происходит воздействие на экосистемы, не только прилегающие непосредственно к предприятиям, но и

в больших масштабах биосферы. Особенно уязвимым звеном окружающей среды становятся водные ресурсы, куда вместе со сточными водами попадают различные загрязняющие вещества, в том числе масла, нефть, мазут, химические соединения, красители, включая органические, поверхностно-активные вещества. Загрязнение природных водных экосистем приводит к гибели гидробионтов, нарушению экологического равновесия, негативно влияет на человека, в том числе на сельскохозяйственную деятельность, рыболовство.

Снижение негативного воздействия стоков на водные ресурсы является актуальной проблемой.

Особое внимание уделяется очистке сточных вод от красителей, которые устойчивы к температуре, свету,

способные оказывать канцерогенное, аллергическое, мутагенное воздействие. Большую угрозу красители, в том числе органические, представляют собой благодаря отсутствию возможности их биологического разложения [1, 2].

Выделяются такие виды красителей как кислотные, основные, прямые, дисперсные, протравные, реактивные, сернистые, азокрасители и нитрокрасители. Чаще всего в сточных водах содержатся метиленовый синий, кристаллический фиолетовый, метиловый красный, дисперсионный фиолетовый, метиленовый оранжевый, активный красный, бриллиантовый зелёный красители, а также Родамин Б и конго красный [2].

Среди методов очистки сточных вод от различного рода загрязнителей, в том числе органических красителей распространены физико-химические, включая флотацию, флокуляцию, коагуляцию, окисление, электрокоагуляцию, ионный обмен, адсорбцию. Благодаря возможности направленного изменения характеристик сорбционных материалов, в том числе волокнистых, применяемых для улавливания красителей из технологических сбросов, разнообразию сорбентов, их эффективности и относительно низких затрат, наибольшее распространение получили сорбционные методы очистки стоков [2,3].

В лабораториях создаются новые сорбционные материалы, среди которых благодаря уникальным свойствам, обеспечивающим высокую эффективность извлечения загрязняющих веществ, например, фенола, в том числе красителей, такого как Родамин Б, известность получили углеродные [4–7].

Известно исследование, в котором изучается возможность очистки сточных вод от красителя Brilliant Red HE-3B углеродным порошкообразным сорбентом PAC-53C. Установлено, что на сорбцию оказывает воздействие температура очищаемых стоков. Чем она выше, тем эффективнее улавливание загрязняющего вещества [7].

В целях энергоресурсосбережения ряд исследователей проводят эксперименты, посвящённые применению для очистки сточных вод от органических загрязнителей сорбционных материалов, в том числе волокнистых, получаемых из отходов промышленности и потребления.

Цели и задачи исследования

Целью работы является исследование возможности сорбционной очистки сточных вод от красителей, в том числе органических, с помощью различного рода сорбентов, в том числе получаемых из отходов первичной переработки льна.

Задачами исследования являются анализ публикаций, связанных с применением углеродных, природных сорбционных материалов, в том числе отходов льнопереработки для очистки сточных вод от органических загрязнений, а также анализ эффективности использования данных материалов для очистки стоков от красителей.

Материалы исследования

Волокнистые сорбционные материалы, получаемые на основе отходов первичной переработки льна, обладают характеристиками, которые близки к некоторым искусственным волокнам. Льняные волокнистые сорбенты обладают специфическими свойствами, среди которых выделяется слоистость. Другими свойствами изученных сорбционных материалов являются воздухопроницаемость, гидрофильность, а также кристалличность и шероховатость [8].

Гидрофильность сорбционных материалов, получаемых из отходов первичной переработки льна, затрудняет улавливание загрязняющих веществ, в том числе органических красителей, из сточных вод, что приводит к низким показателям эффективности данных сорбентов. С целью снижения гидрофильности и увеличения площади взаимодействия с загрязнениями, отходы льнопереработки подвергаются различным модификациям. Среди способов направленного воздействия на структуру изученных сорбционных материалов распространение получили обработка кислотами, щелочами и специальными реагентами, разрядами ВЧ плазмы, ультразвуковая модификация и применение физических полей.

Одним из важнейших свойств любого сорбента является его пористость, от которой зависит характер протекания процесса сорбции и площадь взаимодействия с загрязняющим веществом. У льна-долгунца существует орган, который обеспечивает растение питательными веществами, так называемая ксилема [8].

Ксилема льна состоит преимущественно из макропор. С целью повышения сорбционных характеристик её подвергают биологической обработке с получением мезопор [8].

Среди отечественных исследований, связанных с проблемой очистки сточных вод с использованием отходов льняной промышленности, известна работа И.Г. Шейхиева, посвящённая изучению сорбционной очистки сточных вод от масел марок «И-20А», «ТЭП-15В», «М8Г-2К», «АУ», а также нефтепродуктов с помощью таких отходов первичной переработки льна как костра и пакля [9].

Анализ экспериментальных данных показывает, что льняная костра обладает лучшими показателями эффективности улавливания данных загрязняющих веществ из сточных вод, чем льняная пакля.

Волокнистые сорбционные материалы находят применение в очистке сточных вод от красителя Alazarin Red S [10].

Льняное волокно обрабатывают специальным раствором, который имеет в своём составе гидроксилламин, дистиллированную воду, индикатор метиловый оранжевый и гидроксид натрия, помещённые в покрытую алюминием колбу. Соотношение раствора к сорбенту, полученному из отходов переработки льна, составляет 25 мл раствора на 0,1 грамм сорбционного материала [10].

Поверхность отхода льнопереработки претерпевает изменения, характеризующиеся увеличением площади взаимодействия модифицированного сорбента с загрязняющими веществами, в том числе с красителем Alazarin Red S. Это обеспечивается образованием множества пор различного размера в структуре сорбента.

Экспериментальные данные указывают на то, что степень извлечения красителя Alazarin Red S из сточных вод текстильных предприятий достигает 96,0 % при использовании модифицированного волокнистого сорбента, полученного из отходов первичной переработки льна [10].

Существует ряд исследований, посвящённых сорбционной очистке сточных вод отделочно-красильных производств от реактивного красителя Reactive Red 228 с использованием модифицированной льняной костры, образующейся при переработке льна-долгунца [11, 12].

Модифицирование льняного волокнистого сорбционного материала производится по следующей методике. Костра, отделённая от исходного сырья, подвергается пятикратной промывке с целью удаления различного рода загрязнений и примесей, комбинируя процесс с пятикратной сушкой на открытом воздухе под солнечным светом. С помощью мельничного аппарата будущий сорбент перемалывают в порошок. Размер частиц составляет от 80 до 100 мкг. Полученный в результате перемолки порошок подвергается в промывке с целью удаления растворимых соединений, а оставшийся обрабатывают 1 % раствором хитозана и глицерином в течение часа. По окончании модифицирования данным способом, полученный сорбционный материал высушивается [11].

За счёт образования множества пор различного размера на поверхности модифицируемой льняной костры, являющейся отходом первичной переработки льна, увеличивается площадь взаимодействия полученного сорбционно-активного материала, что увеличивает его сорбционную ёмкость по отношению к красителю Reactive Red 228.

Волокнистые сорбенты, получаемые из отходов первичной переработки льна, могут быть использованы для извлечения красителя C.I. Direct Red 81 из сточных вод. Данный вопрос освещается в работе [13].

Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что сорбция красителя C.I. Direct Red 81 сорбционным волокнистым материалом, получаемым из отходов первичной переработки льна, напрямую зависит от начальной концентрации красителя в воде. Чем ниже процентное содержание C.I. Direct Red 81 в сточных водах, тем больше сорбционная активность полученного сорбента.

Выводы

Таким образом, в работе проведён анализ публикаций, патентов и авторефератов отечественных и зарубежных публикаций, который показывает, что в настоящее время среди всех методов и способов очистки сточных вод от органических загрязнителей, в том числе красителей, наиболее широкое применение находят сорбционные.

Это обусловлено многообразием эффективных материалов, которые могут применяться для извлечения загрязняющих веществ из стоков.

Установлено, что среди природных сорбентов, которые способны улавливать реактивные красители такие как C.I. Direct Red 81 и Reactive Red 228, а также краситель Alazarin Red S, различные масла и нефть, высокую эффективность благодаря своим свойствам показывают сорбционные волокнистые материалы, получаемые из отходов первичной переработки льна, обладающие специфическими характеристиками.

Отходы льноперерабатывающей промышленности могут быть рекомендованы в качестве сорбентов для извлечения красителей из сточных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bilba D., Suteu D., Molutan T. Removal of reactive dye brilliant red HE-3B from aqueous solutions by hydrolyzed polyacrylonitrile fibres: equilibrium and kinetics modelling // Central European Journal of Chemistry. 2008. №6. P. 258–266. DOI: 10.2478/s11532-008-0019-2.
2. Dutta S., Gupta B., Srivastava K., Gupta K. Recent advances on the removal of dyes from wastewater using various adsorbents: a critical review // Material Advances. 2021. №2. P. 4497–4531. DOI: 10.1039/d1ma00354b.
3. Кузнецова Т.С. Композитные материалы на основе нанотрубок и полианилина для сорбционной очистки сточных вод: автореф. дис... кан. хим. наук, 2022, 19 с.
4. Pat. 11345615B2, US, Int. Cl. C 02 F 1/28; B 01 J 20/06. Activated carbon-iron/cerium oxide nanocomposite suitable for dye removal / Awadh Saleh Abdo Tawfik; assignee KING FAHD UNIVERSITY OF PETROLEUM AND MINERALS. — №16/682672; 13.11.2019; 31.05.2022. — 33 с.
5. Коростелева А.В. Способ очистки сточных вод от фенолов // Известия Пензенского государственного педагогического университета имени В.Г. Белинского. Естественные науки. 2011. №25. С.585–589.
6. Патент RU2659285C1. Сорбент на основе модифицированного оксида графена и способ его получения. МПК B01J20/20 B01J20/26 B01J20/32. Ткачев А.Г., Бураков А.Е., Буракова И.В., Малежик А.В., Бабкин А.В., Курносков Д.А., Мкртчян Э.С. Опубл. 29.06.2018, БИ №19.
7. Suteu D., Bilba D. Equilibrium and Kinetic Study of Reactive Dye Brilliant Red HE-3B Adsorption by Activated Charcoal // Acta Chim. 2005. №52. P. 73–69.
8. Алеева С.В., Лепилова О.В., Кокшаров О.В. Возможности биохимической модификации льняной костры для получения нефтесорбентов // Технология текстильной промышленности, 2019. №6. С.39–46.
9. Шейхиев И.Г., Назимов Р.Х., Степанова С.В., Фридланд С.В. Отходы переработки льна в качестве сорбентов нефтепродуктов. 1. Определение нефтеемкости // Вестник Башкирского университета, 2010. №2. С.304–306.
10. Akl A., El-Zeny S., Hashem A., El-Gharkawy H., Mostafa G. Flax fiber based semicarbazide biosorbent for removal of Cr(VI) and Alizarin Red S dye from wastewater // Scientific Reports. 2023. №13. P. 1–25. DOI: 10.1038/s41598-023-34523-y.
11. Feng H., Wang L. The removal of Reactive Red 228 dye from aqueous solutions by chitosan-modified flax shive // BioRes. 2012. №7. P. 624–639.
12. Wang L., Jian L. Adsorption of C.I. Reactive Red 228 dye from aqueous solutions by modified cellulose from flax shive: Kinetics, equilibrium, and thermodynamics // Industrial Crops and Products. 2013. №42. P.153–158.
13. Vuckovic N., Nikodijevic M., Djordjevic D. The study of direct dye sorption on flax fibers during dyeing // Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly. 2021. №27. P. 255–263.

© Уваров Максим Михайлович (uvarov_maxim@rambler.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

НЕПАТОГЕННЫЕ БАКТЕРИИ В ПРОТИВООПУХОЛЕВОЙ ТЕРАПИИ

NON-PATHOGENIC BACTERIA IN ANTITUMOR THERAPY

**E. Sheyko
T. Sataieva
N. Smagliy
G. Reshetnik**

Summary. The use of bacteria and products based on them has a high potential among the immunotherapy of tumor diseases. Bacterial therapy for cancer can be used both as a monotherapy and in combination with other anti-tumour treatments to achieve high clinical outcomes. This review represents the main mechanisms of action on tumours by bacteria; the most significant results from pre-clinical trials of bacterial antitumour drugs; modern directions of the construction of bacterial strains as means of delivery of chemotherapy drugs in tumors. We also discuss how various non-pathogenic bacteria have been modified through genetic engineering to develop the ability to cause tumor regression, and prospects for bacterial antitumor therapy. It is concluded that the development of bacterial agents for cancer therapy is a promising direction of experimental oncology.

Keywords: cancer, bacterial therapy, cancer immunotherapy, bacteriotherapy, tumor-targeting bacteria, therapeutic bacteria.

Шейко Елена Анатольевна

К.б.н., преподаватель,
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет
имени В.И. Вернадского»; г. Симферополь
lenasheyko@mail.ru

Сатаева Татьяна Павловна

К.м.н., доцент, преподаватель,
ГАОУ ВО «Крымский федеральный университет
имени В.И. Вернадского»; г. Симферополь
tanzcool@mail.ru

Смаглий Наталья Николаевна

Ассистент, ФГАОУ ВО «Крымский федеральный
университет имени В.И. Вернадского»; г. Симферополь
scarletsun7991@mail.ru

Решетник Галина Васильевна

К.б.н., преподаватель,
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет
имени В.И. Вернадского»; г. Симферополь

Аннотация. Среди иммунотерапии опухолевых заболеваний применение бактерий и продуктов на их основе имеет высокий потенциал. Для достижения высоких клинических результатов бактериальная терапия онкологических заболеваний может использоваться как в качестве монотерапии, так и в сочетании с другими противоопухолевыми методами лечения. В данном обзоре представлены основные механизмы воздействия на опухоль с помощью бактерий; наиболее значимые результаты доклинических испытаний бактериальных противоопухолевых препаратов; современные направления конструирования бактериальных штаммов как средств доставки химиотерапевтических препаратов в опухоли. Мы также обсуждаем, как различные непатогенные бактерии были модифицированы с помощью генной инженерии для развития способности вызывать регрессию опухоли, и перспективы бактериальной противоопухолевой терапии. Сделано заключение о том, что разработка бактериальных средств терапии онкологических заболеваний является перспективным направлением экспериментальной онкологии.

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

Онкологические заболевания являются одной из глобальных проблем здравоохранения. Традиционные методы лечения не смогли снизить растущий с каждым годом уровень смертности от онкологических заболеваний. Побочные эффекты химиотерапии, лучевой терапии и альтернативных методов лечения рака, включая токсичность для здоровых клеток, неспособность химиотерапевтических препаратов проникать в глубокие слои опухоли и постоянное повышение лекарственной устойчивости опухолевых клеток,

увеличили потребность в разработке альтернативных подходов терапии с большей селективностью и эффективностью против опухолевых клеток. Бактериальные средства лечения злокачественных новообразований известны уже более ста лет, однако в клинике они нашли весьма ограниченное применение [1].

В последние годы, благодаря развитию новых технологий и методов получения аттенуированных штаммов бактерий, исследования были в основном сосредото-

чены на биохимических и молекулярных методах, с помощью которых можно использовать бактерии в борьбе с раком. Бактерии представляют особый интерес из-за их естественной способности к передвижению, которая позволяет им проникать в гипоксические участки опухоли и впоследствии размножаться внутри опухолевых клеток. Это решает проблему, с которой обычно сталкиваются при использовании химиотерапевтических препаратов, которые достигают, главным образом, васкуляризованных внешних краев опухоли, но не гипоксического центра. Кроме того, бактерии могут быть генетически модифицированы для переноса и экспрессии терапевтических препаратов и опухоль-ассоциированных антигенов (ТАА), доставки генов или транспорта химиотерапевтических веществ. Прямая доставка препаратов с помощью бактерий к месту локализации опухоли усиливает специфическую терапию, направленную на опухоль, и ограничивает побочные эффекты лечения [2]. Бактерии также можно использовать для синтеза терапевтических веществ внутри опухолевых клеток [3]. Несмотря на то, что наше понимание методов лечения рака значительно расширилось, все еще остается необходимость поиска более перспективных способов, возможно, посредством использования известных микроорганизмов. В доклинических и клинических исследованиях различные виды бактерий показали свою эффективность в активации противоопухолевого иммунитета путем инициации врожденных и адаптивных иммунных реакций, что повысило шансы на элиминацию опухоли без дополнительных побочных эффектов [4–5]. Микроорганизмы содержат множество механизмов, потенциально способных помочь в лечении рака, многие из которых нам еще предстоит открыть и детально изучить. Полученные к настоящему времени результаты доклинических исследований и первых попыток использования бактерий для лечения больных позволяют считать, что разработка бактериальных средств терапии рака является перспективным направлением экспериментальной онкологии.

Применение бактерий в противоопухолевой терапии заключается в нацеливании конкретных бактериальных компонентов или механизмов на опухолевые клетки. Основные механизмы, ответственные за противоопухолевую активность, включают:

- 1) воздействие бактерий на микроокружение опухоли;
- 2) применение бактериоботов;
- 3) применение факторов патогенности бактерий;
- 4) секреция цитотоксических веществ через системы секреции T1SS и T3SS;
- 5) бактериальные мутации

1. *Bifidobacterium spp.* Из 50 известных видов *Bifidobacterium spp.*, обитающих в различных средах, только 10 обнаруживаются у человека. Многие исследо-

вания указывают на противоопухолевую активность этих микроорганизмов [6]. Хотя бифидобактерии успешно колонизируют опухолевые клетки, их противоопухолевые свойства еще недостаточно изучены. Тем не менее, предварительные наблюдения вдохновили на исследование *Bifidobacterium spp.* в качестве основного метода доставки, поддающегося биоинженерной модификации для экспрессии генов, представляющих интерес для иммунотерапии рака. Wang et al. продемонстрировали, что генетически модифицированный штамм *B. breve*, производящий IL-24 (*B. breve*-IL24), ингибирует рост опухолей головы и шеи, вызывая апоптоз [7]. На моделях мышей было показано, что *Bifidobacterium spp.* могут доставлять энтеролактон, который трансформирует жирные кислоты в пектинолигосахариды (POS), замедляющие развитие лейкемии [8]. Первоначально использование *Bifidobacterium* для доставки генов исследовалось с целью определения способности *B. longum* 105-A трансформироваться с помощью гена, обеспечивающего устойчивость к спектиномицину, что подтверждало передачу генов в мышах. Позднее эта концепция была адаптирована для генной терапии в контексте рака, например, для гена эндостатина — ингибитора фактора роста основных фибробластов (bFGF), который стимулирует пролиферацию эндотелиальных клеток в сосудах. Достижение дормантного состояния в первичных опухолях возможно через системное введение эндостатина мышам с опухолями. Эндостатинсодержащий *B. adolescentis* продемонстрировал ингибирование роста гипоксических опухолей и ангиогенеза при внутривенном введении мышам, зараженным раком печени Hep3 [9]. Производство фермента цитозиндеаминазы (CD) в *B. longum* было объединено с 5-фтороцитозином (5FC) в солидных опухолях, включая рак молочной железы. В результате реакции между 5FC и CD была обнаружена высокая концентрация 5-фторурацила (5FU) в опухоли. Это оказалось полезным для онкологической терапии, поскольку 5FU является более токсичным предшественником по сравнению с 5FC; таким образом, можно было бы избежать системного распределения 5FU и использовать 5FC, который превратится в 5FU исключительно в области опухоли [10–11].

B. breve показал возможность успешной колонизации твердых меланом у мышей B16 после перорального введения и перемещения в желудочно-кишечный тракт. Однако воздействие бифидобактерий в основном оценивалось с помощью внутривенных инъекций, причем более распространенные терапевтические препараты для лечения рака молочной железы описаны в научной литературе. Трастузумаб стал основным средством лечения HER2-положительного рака молочной железы в качестве моноклонального антитела, нацеленного на HER2. Генетически модифицированная версия *B. longum* продемонстрировала значительное подавление ксенографных HER2-положительных опухолей человека в мышах.

Более того, эффективная доставка к твердым опухолям с использованием микроботов *Bifidobacterium* была продемонстрирована в модели мышей с помощью флуоресцентного изображения квантовых точек CdSeS [12].

2. *Lactobacillus* spp. *Lactobacillus* — род грамположительных палочковидных бактерий, населяющих кишечный микробиом человека и других млекопитающих. Ключевая роль этих бактерий заключается в совместном использовании ферментации молочной кислоты с другими бактериями и дальнейшем укреплении кишечного барьера. На модели злокачественной меланомы человека было показано, что форма L-14 экстракта *L. plantarum* ингибирует жизнеспособность и перемещение клеток A375, а также регулирует экспрессию генов, участвующих в миграции [13]. *Lactobacillus casei* обладает противоопухолевым действием, опосредованным подавлением IL-22 и активацией каспаз, индуцируя апоптоз. *Lactobacillus* нацелены на злокачественные клетки, продуцируя бактериоцины, такие как низин, которые индуцируют апоптоз и уменьшают пролиферацию клеток за счет остановки клеточного цикла в фазе G2 [14]. Kim и др. сообщили об использовании пробиотика *Lactobacillus kimchicus* DCY51 для нековалентной загрузки гинсенозидного соединения К (СК). СК высоко ценится в традиционной китайской фитотерапии благодаря содержащимся в нем биоактивным тритерпеноидным сапонидам, и было доказано, что он ингибирует гормон-независимый рак молочной железы путем подавления циклина D1, важной части фазы G1 клеточного цикла [15]. Это исследование продемонстрировало, что DCY51, связанный с наночастицами, убивает больше клеток A549 (клеточная линия аденокарциномы легких человека) и клеток HT29 (клеточная линия колоректальной аденокарциномы человека) по сравнению с лечением только гинсенозидом СК. Другое исследование с использованием мышиной модели меланомы показало, что штамм *L. reuteri* FLRE5K индуцирует более высокие уровни цитокинов TNF- α и IFN- γ , которые стимулируют иммунитет и препятствуют пролиферации клеток меланомы [16]. Альтернативно, *Lactobacillus*, обогащенные селеном, продемонстрировали положительные противоопухолевые эффекты, поскольку LAB могут образовывать наночастицы элементарного селена (SeNP) путем восстановления ионов селена, а затем переходить к выведению наночастиц внутриклеточно. Как антиканцерогенный незаменимый микроэлемент, селен предотвращает активацию онкогенов и, следовательно, предотвращает трансформацию нормальных клеток в злокачественные. Это было оценено на мышах с раком молочной железы 4T1, где было показано, что лечение обогащенными *Lactobacillus* увеличивает выживаемость и уменьшает количество метастазов опухоли в печень [17]. В другом исследовании флуоресцентные наночастицы неорганического сульфида кадмия (CdS) были успешно транспортированы в клетки рака молочной железы MCF-7 с помощью

Lactobacillus spp. как вектор. В исследовании титрования авторы показали, что увеличение концентрации NPs CdS постепенно снижает метаболическую активность клеток MCF-7 до тех пор, пока не будет достигнута пиковая концентрация 5 ppm CdS NPs, с 80 % гибелью клеток через 24 часа и полной гибелью клеток через 48 часов [18].

3. *Lactococcus* spp. Бактерии рода *Lactococcus* впервые были использованы в качестве средства доставки лекарственных препаратов для лечения воспалительных заболеваний кишечника, где они были генетически модифицированы для выработки IL-10 [19]. Следуя этому подходу *Lactococcus* изучали как перспективный вектор для доставки химиотерапевтических препаратов и генов в различные опухоли. *Lactococcus lactis* использовался в качестве источника производства пептидов KiSS1, при этом *L. lactis* NZ9000-401 был сконструирован для экспрессии человеческого KiSS1. Пептид KiSS1 играет важную роль как опухолевый супрессор, ингибируя метастазы рака [20]. Клетки HT-29 продемонстрировали морфологические изменения и признаки апоптоза после воздействия *L. lactis*, экспрессирующего KiSS1. Хотя данное исследование сосредоточено на раковых клетках толстой кишки HT-29 человека, KiSS1 также экспрессируется в клетках рака груди человека. Это позволяет предположить, что данная терапия может быть применена, в частности, для лечения рака молочной железы.

В качестве альтернативы, эффективность использования *L. lactis* в терапии рака молочной железы была продемонстрирована успешной секрецией лекарственной формы, показывающей эффективность в снижении размеров опухолей и замедлении их роста. Активная форма *L. lactis* продемонстрировала успешную экспрессию Mig и IP-10 [21], которые являются хемокинами, способствующими привлечению иммунных клеток к месту инфекции. Оба компонента, Mig и IP-10, обладают антиангиогенными свойствами, что критично для противоопухолевого иммунитета. Кроме того, *L. lactis* был генетически модифицирован для индукции IL-12, представляющего собой вещество интерлейкинового семейства с иммунорегулирующим действием, включая стимуляцию секреции IFN и иммунного ответа Th1, а также ингибирование реактивности Th2. Несмотря на то, что *Lactococcus* представляет собой перспективное и безопасное средство для лечения рака молочной железы, необходимо провести дополнительные исследования прежде, чем он будет внедрен в клиническую практику как основное средство терапии.

Уникальные особенности организации генома бактерий, их высокая специфичность и способность проникать в гипоксическую область опухоли, позволяет использовать их в противоопухолевой терапии. Однако, несмотря на высокий терапевтический потенциал бактерий, существует ряд проблем, которые еще предстоит

решить ученым. Генетическая гетерогенность бактерий может стать их самой сильной чертой, которая позволит получить генно-модифицированные штаммы для персонализации терапии и достижения максимального цитотоксического эффекта. Также бактерии возможно применять с другими методами терапии. Например, сочетание химиотерапевтических препаратов, воздействующих на аэрированные слои опухоли, и бактерий, действующих

на гипоксические слои опухоли. Также для терапии возможно одновременное использование нескольких штаммов непатогенных бактерий, мишенью для которых являются разные области опухоли. Использование бактерий для адресной доставки химиотерапевтических препаратов в опухоль также является очень перспективным направлением в разработке эффективной противоопухолевой терапии.

ЛИТЕРАТУРА

- McCarthy E.F. The toxins of William B. Coley and the treatment of bone and soft-tissue sarcomas // *Iowa Orthop. J.* — 2006. — Vol. 26. — P. 154–158.
- Łukasiewicz K. Microorganisms in the Treatment of Cancer: Advantages and Limitations / K. Łukasiewicz, M. // *J. Pol. Immunol. Res.* — 2018;. — Vol. 23. — P. 978–1008.
- St Jean A.T. Bacterial delivery of Staphylococcus aureus hemolysin causes regression and necrosis in murine tumors / A.T. St Jean, C.A. Swofford, J.T. Panteli, Z.J. Brentzel, N.S. Forbes // *Mol. Ther.* — 2014. — Vol. 22. — P. 1266–1274.
- Kalaora S. Identification of bacteria-derived HLA-bound peptides in melanoma / S. Kalaora, A. Nagler, D. Nejman, M. Alon, C. Barbolin, E. Barnea, S.L.C. Ketelaars, K. Cheng, K. Vervier, N. Shental // *Nature.* — 2021. — Vol. 592. — P. 138–143.
- Antonelli A.C. Bacterial immunotherapy for cancer induces CD4-dependent tumor-specific immunity through tumor-intrinsic interferon—signaling / A.C. Antonelli, A. Binyamin, T.M. Hohl, M.S. Glickman, G. Redelman-Sidi // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* — 2020. — N 117. — P. 18627–18637.
- Ngo N. Bifidobacterium spp: The promising Trojan Horse in the era of precision oncology / N. Ngo, K. Choucair, J.F. Creeden, H. Qaqish, K. Bhavsar, C. Murphy, K. Lian, M.T. Albrethsen, L. Stanbery, R.C. Phinney // *Future Oncol.* — 2019. — Vol. 15. — P. 3861–3876.
- Wang Q. Administration of Bifidobacterium bifidum CGMCC 15068 modulates gut microbiota and metabolome in azoxymethane (AOM)/dextran sulphate sodium (DSS)-induced colitis-associated colon cancer (CAC) in mice. / Q. Wang, K. Wang, W. Wu, L. Lv, X. Bian, L. Yang, Q. Wang, Y. Li, J. Ye, D. Fang // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* — 2020. — Vol. 104. — P. 5915–5928.
- Wei C. Bifidobacteria Expressing Tumstatin Protein for Antitumor Therapy in Tumor-Bearing Mice / C. Wei, A.Y. Xun, X.X. Wei, J. Yao, J.Y. Wang, R.Y. Shi, G.H. Yang, Y.X. Li, Z.L. Xu, M.G. Lai // *Technol. Cancer Res. Treat.* — 2016. — Vol. 15. — P. 498–508.
- Li X. Bifidobacterium adolescentis as a delivery system of endostatin for cancer gene therapy: Selective inhibitor of angiogenesis and hypoxic tumor growth / X. Li, G.-F. Fu, Y.-R. Fan, W.-H. Liu, X.-J. Liu, J.-J. Wang, G.-X. Xu // *Cancer Gene Therapy.* — 2003. — Vol. 10. — P. 105–111.
- Cano-Garrido O. Lactic acid bacteria: Reviewing the potential of a promising delivery live vector for biomedical purposes / O. Cano-Garrido, J. Seras-Franzoso, E. Garcia-Fruits // *Microb Cell Fact.* — 2015. — Vol. 14. — P. 137.
- Fujimori M. Genetically engineered Bifidobacterium as a drug delivery system for systemic therapy of metastatic breast cancer patients // *Breast Cancer.* — 2006. — Vol. 13(1). — P. 27–31.
- Kikuchi T. In situ delivery and production system of trastuzumab scFv with Bifidobacterium / T. Kikuchi, H. Shimizu, Y. Akiyama, S. Taniguchi // *Biochem. Biophys. Res. Commun.* — 2017. — Vol. 493. — P. 306–312.
- Park J. Anti-Cancer Effects of Lactobacillus plantarum L-14 Cell-Free Extract on Human Malignant Melanoma A375 / J. Park, M. Kwon, J. Lee, S. Park, J. Seo, S. Roh // *Cells. Molecules.* — 2020. — Vol. 25. — P. 3895.
- Kamarajan P. Bacteriocin and Food Preservative, Inhibits Head and Neck Cancer Tumorigenesis and Prolongs Survival / P. Kamarajan, T. Hayami, B. Matte, Y. Liu, T. Danciu, A. Ramamoorthy, F. Worden, S. Kapila, Y. Kapila Z.P. // *PLoS ONE.* — 2015. — Vol. 10. — P. 131–138.
- Kim Y.J. Development of Lactobacillus kimchicus DCY51(T)-mediated gold nanoparticles for delivery of ginsenoside compound K: In vitro photothermal effects and apoptosis detection in cancer cells / Y.J. Kim, H. Perumalsamy, J. Markus, S.R. Balusamy, C. Wang, S. Ho Kang, S. Lee, S.Y. Park, S. Kim, V. Castro—Aceituno // *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.* — 2019;. — Vol. 47. — P. 30–44.
- Luo M. Preventive effect of Lactobacillus reuteri on melanoma / M. Luo, M. Hu, X. Feng, W. XiaoLi, D. Dong, W. Wang. // *Biomed. Pharmacother.* — 2020. — Vol. 126. — P. 109929.
- Yazdi M.H. Selenium nanoparticle-enriched Lactobacillus brevis causes more efficient immune responses in vivo and reduces the liver metastasis in metastatic form of mouse breast cancer / M.H. Yazdi, M. Mahdavi, N. Setayesh, M. Esfandyar, A.R. Shahverdi // *Daru.* — 2013. — Vol. 21. — P. 33.
- Raj R. Development and application of anticancer fluorescent CdS nanoparticles enriched Lactobacillus bacteria as therapeutic microbots for human breast carcinoma / R. Raj, S. Das // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* — 2017. — Vol. 101. — P. 5439–5451.
- Steidler L. Biological containment of genetically modified Lactococcus lactis for intestinal delivery of human interleukin 10 / L. Steidler, S. Neirynck, N. Huyghebaert, V. Snoeck, A. Vermeire, B. Goddeeris, E. Cox, J.P. Remon, E. Remaut // *Nat. Biotechnol.* — 2003. — Vol. 21. — P. 785–789.
- Zhang Y.E. coli Nissle 1917-Derived Minicells for Targeted Delivery of Chemotherapeutic Drug to Hypoxic Regions for Cancer Therapy / Y. Zhang, W. Ji, L. He, Y. Chen, X. Ding, Y. Sun, S. Hu, H. Yang, W. Huang // *Theranostics.* 21. Bahey-El-Din M. Lactococcus lactis as a cell factory for delivery of therapeutic proteins / M. Bahey-El-Din, C.G. Gahan, B.T. Griffin // *Curr. Gene Ther.* — 2010. — Vol. 10. — P. 34–45.

© Шейко Елена Анатольевна (lenasheyko@mail.ru); Сатаева Татьяна Павловна (tanzcool@mail.ru);

Смаглий Наталья Николаевна (scarletsun7991@mail.ru); Решетник Галина Васильевна

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АНАЛИЗА РИСКОВ ПРИ РАССМОТРЕНИИ ЗАЯВОК НА ИПОТЕЧНОЕ КРЕДИТОВАНИЕ

THE POSSIBILITIES OF USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES TO ANALYZE RISKS WHEN CONSIDERING MORTGAGE APPLICATIONS

**D. Borisenko
K. Kovalenko**

Summary. The relevance of the work is due to the rapid development of artificial intelligence technologies and their application in the financial sector, including in the mortgage lending process. With the growing volume of mortgage loan applications and the need to improve the quality of decision-making, the task of optimizing the risk analysis associated with issuing loans is becoming urgent. The purpose of the work is to explore the possibilities of using artificial intelligence technologies to analyze risks when considering mortgage loan applications. Within the framework of the study, the issues of the development of intelligent technologies in the banking sector are update, and a model of an intelligent algorithm of an expert system proposed that could assess the creditworthiness of a borrower taking into account various risk factors. The significance of the article lies in the possibility of implementing the proposed model in credit institutions to increase the efficiency of the mortgage lending process and minimize errors in assessing borrowers.

Keywords: artificial intelligence, automation, banking, decision-making, mortgage lending, expert system.

Борисенко Даниил Дмитриевич

ФГБОУ «Балтийский государственный технический
университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова»
borisenkodaniil25@gmail.com

Коваленко Клеопатра Дмитриевна

ФГБОУ «Северо-Западный государственный медицинский
университет имени И.И. Мечникова»
Министерства здравоохранения Российской Федерации

Аннотация. Актуальность работы обусловлена стремительным развитием технологий искусственного интеллекта и их применением в финансовом секторе, в том числе в процессе ипотечного кредитования. В условиях растущего объема заявок на ипотечные кредиты и необходимости повышения качества принятия решений, актуальной становится задача оптимизации анализа рисков, связанных с выдачей кредитов. Целью работы является исследование возможностей применения технологий искусственного интеллекта для анализа рисков при рассмотрении заявок на ипотечное кредитование. В рамках исследования актуализированы вопросы развития интеллектуальных технологий в банковской сфере, а также предложена модель интеллектуального алгоритма экспертной системы, способная оценивать кредитоспособность заемщика с учетом различных факторов риска. Значимость статьи заключается в возможности внедрения предложенной модели в кредитные организации для повышения эффективности процесса ипотечного кредитования и минимизации ошибок при оценке заемщиков.

Ключевые слова: искусственный интеллект, автоматизация, банковская сфера, принятие решений, ипотечное кредитование, экспертная система.

Введение

На 2025 год банковская сфера России продолжает функционировать в условиях высокой экономической нестабильности, вызванной, в том числе, значительным ростом ключевой ставки до 21 % в 2024 году, с сохранением этого уровня на текущий момент, согласно данным Центрального Банка России [1]. Эти изменения оказывают непосредственное влияние на финансовые условия для граждан и организаций, что приводит к увеличению стоимости кредитования, а также к снижению доступности ипотечных кредитов для широких слоев населения. В этих условиях банки сталкиваются с необходимостью более тщательной оценки рисков при рассмотрении заявок на ипотечное кредитование, что особенно важно для минимизации финансовых потерь и защиты от дефолтов.

В ответ на вызовы современной экономической ситуации становится все более очевидной необходимость интеграции интеллектуальных технологий в банковскую сферу. В частности, использование искусственного интеллекта (далее — ИИ) и машинного обучения (далее — МО) для автоматизации процесса анализа заявок на ипотечное кредитование предоставляет уникальные возможности для повышения точности и эффективности принятия решений. Интеллектуальные системы могут значительно улучшить оценку рисков, ускорить процесс рассмотрения заявок и, как следствие, повысить общую эффективность кредитования в условиях нестабильности. Настоящая статья посвящена исследованию возможностей применения технологий ИИ для анализа рисков при рассмотрении заявок на ипотечное кредитование. В рамках работы рассматривается создание модели интеллектуального алгоритма экспертной системы, способного объектив-

но и точно оценивать кредитоспособность заемщика с учетом множества факторов.

Результаты и обсуждение

2024 и 2025 годы ознаменованы интенсивным развитием и интеграцией технологий искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) в финансовом секторе. По данным исследований Secuteck.Ru, внедрение ИИ в финансовых операциях значительно возросло: в 2024 году 58 % организаций используют эту технологию, что представляет собой рост на 21 % по сравнению с 2023 годом [2]. Этот рост свидетельствует о стремительном принятии ИИ-решений в банковской сфере и других финансовых учреждениях, что является важным шагом в модернизации и оптимизации процессов в условиях меняющейся экономической обстановки. Использование ИИ в финансовых операциях позволяет решать множество задач, связанных с обработкой и анализом больших объемов данных, прогнозированием рисков, повышением точности принятия решений и улучшением качества обслуживания клиентов. Среди ключевых возможностей преимуществ применения ИИ в банковской сфере можно выделить (табл. 1):

Таблица 1.
Возможности и преимущества ИИ в банковской сфере

№	Возможность	Преимущества
1	Автоматизация процессов	Ускоряет обработку заявок, снижает затраты времени и ресурсов на принятие решений.
2	Улучшение точности оценки рисков	Повышает точность анализа заемщика и снижает количество дефолтов за счет более детального анализа.
3	Повышение эффективности обслуживания клиентов	Обеспечивает персонализацию предложений и улучшение качества взаимодействия с клиентами.
4	Обработка больших данных в реальном времени	Способствует быстрому анализу больших объемов данных, что критически важно для принятия решений.
5	Предотвращение мошенничества и финансовых преступлений	Позволяет выявлять аномалии и подозрительные транзакции, предотвращая мошенничество.

Так, внедрение искусственного интеллекта в финансовую сферу предоставляет новые возможности для повышения эффективности, надежности и скорости принятия решений, что критически важно в условиях современных вызовов и нестабильности экономической ситуации. Как отмечают в своем исследовании Ю.Б. Бубнова и К.А. Ахмедова (2023), одной из наиболее актуальных и требующих особого внимания задач является анализ рисков при одобрении заявки на ипотечное

кредитование [3]. Ситуация на рынке ипотечного кредитования в последние годы переживает значительные изменения, что связано с нестабильностью экономической обстановки, высокой инфляцией и изменением ключевых ставок, что напрямую влияет на уровень кредитных рисков. Учитывая нестабильность на рынке, банки сталкиваются с необходимостью более тщательной оценки потенциальных заемщиков, чтобы минимизировать возможные потери и защититься от неплатежеспособности клиентов. Одной из важнейших задач в этом процессе является точная и своевременная оценка финансовой стабильности заемщика, его платежеспособности и потенциальных рисков, связанных с его кредитной историей и социальным положением. Однако традиционные методы анализа часто оказываются недостаточно эффективными в условиях постоянных изменений и большого объема данных, которые необходимо учитывать при принятии решений.

Именно в этих условиях применение искусственного интеллекта и машинного обучения становится крайне необходимым. Эти технологии позволяют эффективно обрабатывать большие объемы данных, выявлять скрытые закономерности и прогнозировать возможные риски, которые не всегда очевидны для традиционных методов анализа. ИИ способен в реальном времени обрабатывать различные параметры заемщика (кредитная история, доходы, семейное положение, регион проживания и другие) и выстраивать комплексную картину его платежеспособности [4]. Ключевым направлением для улучшения процесса анализа рисков является создание интеллектуальной экспертной системы, основанной на технологиях ИИ. Такая система может интегрировать и обрабатывать различные источники данных, включая структурированные и неструктурированные данные, а также учитывать сложные взаимоотношения между различными факторами, которые могут повлиять на решение о выдаче кредита. Интеллектуальная экспертная система обеспечит более точный и своевременный анализ заявок на ипотечное кредитование, что позволит значительно снизить риски для финансовых учреждений и повысить качество обслуживания клиентов.

В предлагаемой автором экспертной системе для анализа рисков при ипотечном кредитовании основой является создание единого реестра информации о клиенте, а также модулей для обработки данных. Важным элементом системы является интеграция интеллектуальных технологий для анализа больших объемов данных, что позволяет значительно повысить точность и скорость обработки информации [5]. Ключевыми компонентами системы должны стать: база данных, блоки моделирования, синтезатора и коррелятора. Модуль моделирования отвечает за обработку исходных данных, синтезатор формирует связи между параметрами, а коррелятор анализирует их взаимозависимости. На основе расчетов

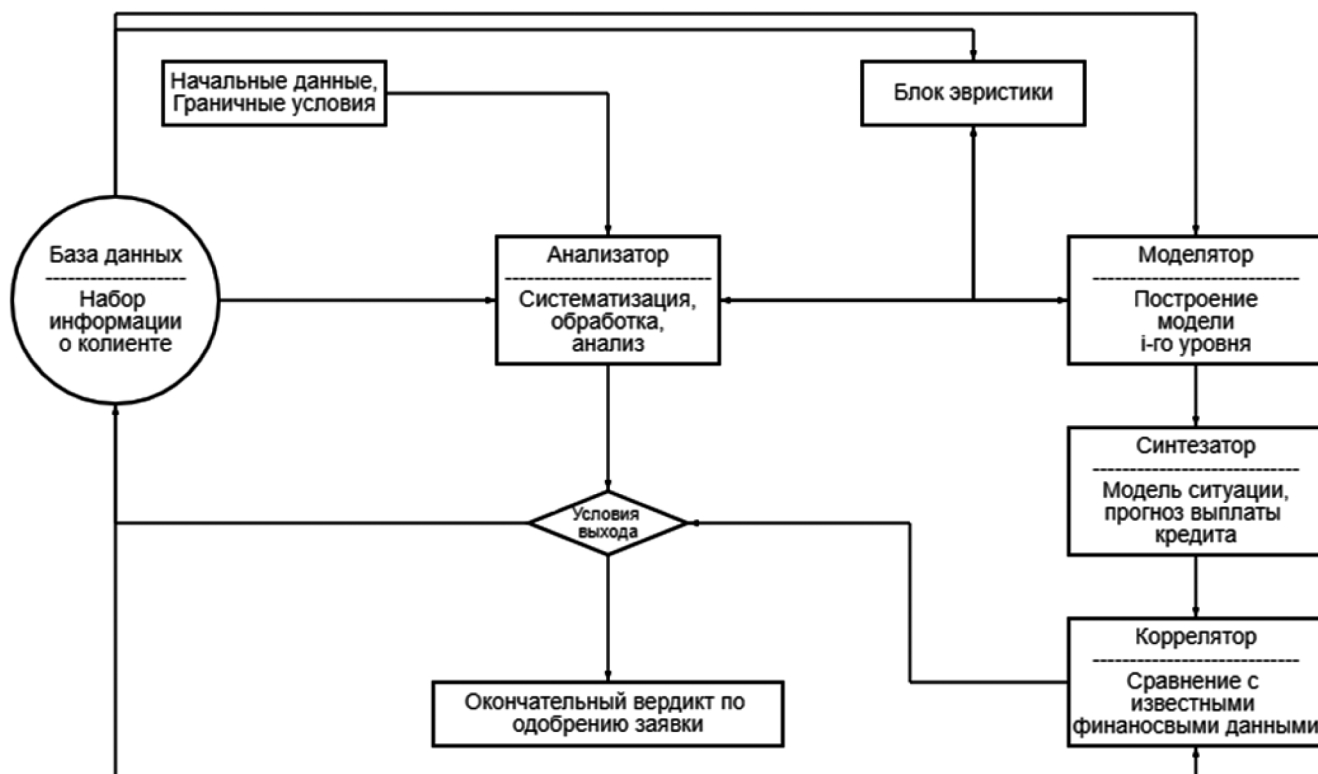


Рис. 1. Модули проектируемой экспертной системы

и данных, полученных в этих блоках, производится итоговый анализ с помощью блока анализатора. Результаты анализа служат основой для принятия решения по заявке на ипотечное кредитование. Модель спроектированной экспертной системы представлена на рис. 1.

Как было указано ранее, для принятия эффективных и обоснованных решений необходимо применять интеллектуальные методы обработки данных. Для реализации блоков «Модельер», «Синтезатор» и «Коррелятор» требуется интеграция технологий искусственного интеллекта, которые обеспечат быструю и точную обработку больших объемов данных. Используя эти модули, возможно сформировать итоговый анализ информации о заемщике, его финансовой состоятельности, возможных рисках и других аспектах, необходимых для принятия решения по ипотечному кредитованию [6]. На рис. 2 представлена детализация работы данных модулей с учетом решаемых задач.

Модуль «Модельер» предполагает использование интеллектуальных методов для предварительного анализа и систематизации данных, например, с применением технологии Balanced Scorecard. В модуле «Синтезатор» должны быть интегрированы ИИ-методы, которые позволят строить временные зависимости и прогнозировать значения. Модуль «Коррелятор» необходим для интерпретации результатов анализа в удобном для пользователя формате, который может быть использован в дальнейшем для принятия решения. Итоговая



Рис. 2. Конкретизация модулей анализа данных

модель оценки заемщика будет включать алгоритм, который шаг за шагом реализует сбор и обработку данных из единого реестра, оценку рисков и принятие решения, как показано на рисунке 3.

Преимущества предложенного алгоритма и модели экспертной системы для анализа рисков при ипотечном кредитовании заключаются в нескольких ключевых аспектах.

1. Алгоритм учитывает все возможные аспекты заемщика, включая его финансовое положение,

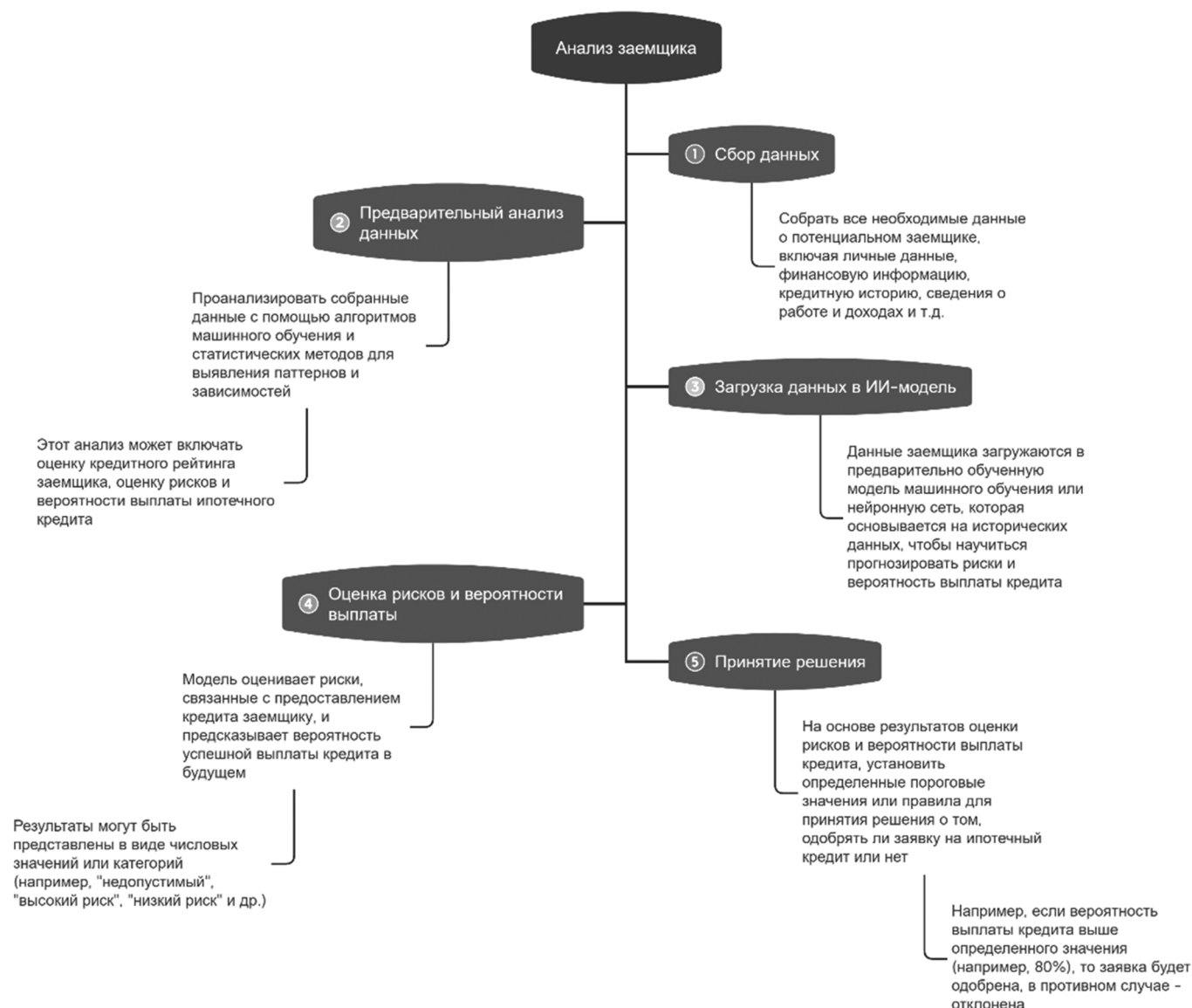


Рис. 3. Модель работы интеллектуального алгоритма экспертной системы для анализа заемщика

историю кредитования, прогнозы по долговым обязательствам и другие данные, что позволяет создать полную картину рисков. Интеграция разных модулей (модельер, синтезатор, коррелятор) обеспечивает всестороннюю обработку данных и комплексный анализ.

2. Модель обеспечивает получение наиболее полной информации о заемщике, включая как объективные финансовые показатели, так и прогнозные значения, что делает результаты анализа более точными и обоснованными. Это минимизирует вероятность ошибки при принятии решения.
3. Использование интеллектуальных методов в каждом модуле системы позволяет анализировать данные на более глубоком уровне, выявляя скрытые зависимости и прогнозируя риски на различных временных интервалах. Модуль синтезатора, в частности, способен строить временные зависи-

мости, которые делают оценку более динамичной и актуальной.

4. Применение ИИ позволяет значительно уменьшить вероятность ошибок, связанных с субъективным подходом, и повысить объективность при принятии решений по заявкам на ипотечное кредитование [7]. Система автоматически оценивает все доступные данные, прогнозирует возможные негативные события, что позволяет банку более точно оценить риски и минимизировать убытки.

Искусственный интеллект в данной системе используется для обработки большого объема данных в реальном времени, выявления закономерностей, прогнозирования результатов и принятия решения. ИИ-методы (например, машинное обучение, анализ временных рядов) помогают выявить скрытые паттерны, которые могут быть неочевидными для традиционных методов

анализа. Это способствует повышению качества анализа и уменьшению влияния человеческого фактора. Как итог, предложенная экспертная система с интеграцией ИИ способна значительно повысить точность и эффективность анализа рисков при ипотечном кредитовании, что поможет сократить финансовые потери, повысить уровень доверия со стороны заемщиков и улучшить качество обслуживания в банковской сфере.

Заключение

В результате проведенной работы установлено, что интеграция искусственного интеллекта и машинного обучения в систему анализа рисков при ипотечном кредитовании значительно улучшает качество обработки и анализа данных. Технологии ИИ позволяют эффективно работать с большими объёмами информации, что сокращает время на принятие решения и делает его более обоснованным. Важным аспектом является модульная структура предложенной модели, которая позволяет гибко адаптировать систему под специфические требования различных финансовых организаций, обеспечивая её высокую адаптивность к изменениям внешней среды.

Использование искусственного интеллекта в процессе анализа рисков не только минимизирует вероятность ошибок и субъективности, но и повышает уровень доверия со стороны клиентов, что в свою очередь способствует улучшению репутации финансовых учреждений. Предложенная модель обладает универсальностью, так как может быть применена не только в ипотечном кредитовании, но и в других сегментах кредитования, таких как автокредиты или потребительские кредиты. Это даёт возможность универсального внедрения системы в различные кредитные процессы. Ожидается, что применение модели на практике позволит значительно повысить оперативность, снизить затраты, уменьшить влияние человеческого фактора и повысить точность прогнозов по заявкам. В долгосрочной перспективе она может привести к улучшению принятия решений, повышению прозрачности и снижению рисков для банка, что способствует его повышению конкурентоспособности и прибыльности. Таким образом, предложенная система представляет собой эффективный инструмент для совершенствования процесса ипотечного кредитования и обладает высоким потенциалом для успешной интеграции в реальную практику банковского сектора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Банк России принял решение сохранить ключевую ставку на уровне 21,00 % годовых. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://clck.ru/3JVTX7> (дата обращения 19.03.2025 г.).
2. В 2024 г. искусственный интеллект используют 58 % финансовых служб. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://clck.ru/3JVXb9> (дата обращения 21.03.2025 г.).
3. Бубнова Ю.Б., Ахмедова К.А. Цифровизация банковского сектора России: тенденции и проблемы // Инновационная экономика: информация, аналитика, прогнозы. 2023. №1. С. 175–181.
4. Зорин Г.Е. Искусственный интеллект и его применение в банковской сфере // Вестник Российского университета кооперации. 2020. № 1(39). С. 31–36.
5. Константинов К.С. Использование технологий искусственного интеллекта при формировании базы данных корпоративных заемщиков банка // Теория и практика общественного развития. 2024. №7. С. 160–165.
6. Мухаметова О.А., Орлова И.А. Применение методов искусственного интеллекта в сфере банковского кредитования юридических лиц // Инновационный потенциал банковской деятельности. 2020. С. 409–413.
7. Шельмина А.С. Искусственный интеллект в банковской деятельности // Школа молодых новаторов. 2023. С. 236–238.

© Борисенко Даниил Дмитриевич (borisenkodaniil25@gmail.com); Коваленко Клеопатра Дмитриевна
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РАЗРАБОТКА ПЛАНА ПРОВЕДЕНИЯ И ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ АУДИТА ГОТОВНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ К ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

DEVELOPMENT OF A PLAN FOR CONDUCTING AND EVALUATING THE RESULTS OF AN AUDIT OF THE COMPANY'S READINESS FOR DIGITAL TRANSFORMATION

**D. Borisenko
K. Kovalenko**

Summary. The urgency of conducting an audit of the company's readiness for digital transformation is due to the rapid development of technology and the need to adapt the business to new conditions. The purpose of the article is to develop a plan for conducting an audit of an enterprise's readiness for digital transformation, as well as a proposed approach to interpreting audit results, which includes a comprehensive analysis of key aspects such as organizational structure, IT infrastructure, personnel readiness and digital technology culture. The results of the work include recommendations for conducting an audit of the company's readiness, including evaluation criteria. The article presents a systematic approach that allows us to assess the degree of business readiness for digital change and identify the main areas for improvement. The benefit of the article is to develop a methodological framework for the successful audit of enterprises' readiness for digital transformation, as well as to develop recommendations that will help organizations build an optimal digitalization strategy.

Keywords: digitalization, digital transformation, digital technologies, readiness audit, digital maturity, automation.

Борисенко Даниил Дмитриевич

ФГБОУ «Балтийский государственный технический
университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»
borisenkodaniil25@gmail.com

Коваленко Клеопатра Дмитриевна

ФГБОУ «Северо-Западный государственный медицинский
университет имени И.И. Мечникова»
Министерства здравоохранения Российской Федерации

Аннотация. Актуальность проведения аудита готовности предприятия к цифровой трансформации обусловлена быстрым развитием технологий и необходимостью адаптации бизнеса к новым условиям. Целью статьи является разработка плана проведения аудита готовности предприятия к цифровой трансформации, а также предложенный подход к интерпретации результатов аудита, который включает комплексный анализ ключевых аспектов, таких как организационная структура, IT-инфраструктура, кадровая готовность и культура цифровых технологий. Результаты работы включают рекомендации по проведению аудита готовности предприятия, включая критерии оценки. В статье представлен системный подход, который позволяет оценить степень готовности бизнеса к цифровым изменениям и выделить основные направления для улучшения. Польза статьи состоит в развитии методологической базы для успешного проведения аудита готовности предприятий к цифровой трансформации, а также в выработке рекомендаций, которые помогут организациям выстроить оптимальную стратегию цифровизации.

Ключевые слова: цифровизация, цифровая трансформация, цифровые технологии, аудит готовности, цифровая зрелость, автоматизация.

Введение

На момент 2025 года цифровизация становится неотъемлемой частью развития современных предприятий и организаций, обеспечивая повышение их эффективности, конкурентоспособности и адаптивности к быстро меняющимся условиям рынка. Согласно статистическим данным НАНГС, объем продаж российских цифровых решений в 2024 году составил рекордные 4,5 трлн рублей (на 46 % больше показателей предшествующего 2023 года), что свидетельствует о высоком уровне спроса на цифровые технологии в разных отраслях экономики [1]. Это подтверждает важность цифровых преобразований для успешного функционирования и устойчивого роста предприятий в условиях глобализации и цифровой экономики.

Однако, несмотря на явный тренд в сторону цифровизации, многие компании сталкиваются с проблемой недостаточной оценки своей готовности к цифровой трансформации. На текущий момент времени предприятиям и организациям часто не уделяется должного внимания вопросу оценки цифровой зрелости, что замедляет темпы внедрения цифровых технологий и создаёт риски для успешной адаптации к новым требованиям рынка. Без полноценной диагностики текущего состояния цифровизации компании не могут эффективно планировать переход к новым технологиям, что ограничивает их возможности и потенциал роста. В рамках настоящей статьи автором предпринимается попытка разработать план проведения аудита готовности предприятия к цифровой трансформации, а также предложить методологию оценки текущего уровня цифровой

зрелости организации. Ожидается, что это позволит систематизировать подходы к оценке и планированию цифровых преобразований, оптимизировать процесс внедрения новых технологий и обеспечить максимальную эффективность цифровых изменений на всех уровнях деятельности предприятия.

Результаты и обсуждение

На начальном этапе работы следует четко определить ключевые понятия, используемые в рамках настоящей статьи. Цифровая трансформация — это процесс интеграции цифровых технологий во все аспекты бизнеса, что приводит к значительным изменениям в способах функционирования компании и создании новых бизнес-моделей. Как отмечают в своем исследовании А.А. Курочкина и К.А. Намазов (2023), цифровая трансформация включает в себя внедрение инновационных решений, таких как искусственный интеллект, большие данные, облачные вычисления и автоматизация, что позволяет предприятиям повысить свою эффективность, улучшить взаимодействие с клиентами и ускорить адаптацию к изменениям рынка [2]. Это не просто внедрение новых технологий, а комплексная перестройка процессов, культуры и стратегии компании с целью достижения более высокой конкурентоспособности и устойчивости в цифровой экономике.

Цифровая зрелость предприятий определяется уровнем готовности организации к интеграции и эффективному использованию цифровых технологий на всех уровнях своей деятельности. И.С. Прохорова и П.М. Гуреев (2023) отмечают, что этот показатель отражает, насколько организация обладает необходимыми цифровыми ресурсами, навыками и инфраструктурой для успешной реализации цифровых преобразований [3]. Цифровая зрелость включает несколько ключевых аспектов: стратегию цифровизации, зрелость IT-структур, уровень использования данных, автоматизацию процессов и степень цифровой культуры среди сотрудников.

Оценка цифровой зрелости предприятий позволяет определить текущее состояние цифровых технологий в организации, выявить слабые места и области для улучшения. Результаты работы авторов А.С. Погорельцева и И.Г. Салимьяновой И.Г. (2022) отражают, что этот процесс включает в себя анализ как технической инфраструктуры (например, наличие или отсутствие облачных решений, систем автоматизации), так и организационной готовности (например, уровня цифровых навыков сотрудников, готовности руководства к изменениям) [4]. Оценка цифровой зрелости позволяет определить, какие шаги необходимо предпринять для ускорения и оптимизации цифровой трансформации.

По результатам анализа текущих тенденций, подходов и научной литературы автором настоящей статьи

определены следующие проблемы и недочеты существующих систем проведения и оценки результатов аудита готовности предприятия к цифровой трансформации: отсутствие унифицированных критериев оценки (множество подходов к оценке цифровой зрелости предприятий не имеет четких и стандартизированных критериев, что затрудняет сравнение и выработку общего подхода); недостаточная интеграция с бизнес-стратегией (в настоящее время многие оценки цифровой зрелости проводят в отрыве от долгосрочной стратегии компании, что снижает их полезность для формирования конкретных шагов цифровой трансформации); неэффективная интерпретация результатов (большинство существующих систем не предоставляют четких и понятных рекомендаций, основанных на результатах аудита, или они предлагают рекомендации общего характера без учета специфики предприятия) [5]. С учетом текущего опыта для достижения максимальной эффективности автором настоящей статьи предлагается следующий план проведения аудита готовности предприятия к цифровой трансформации, представленный в табл. 1.

Каждый этап аудита готовности предприятия к цифровой трансформации тесно связан с последующим, что позволяет не только оценить текущую степень зрелости, но и разработать стратегию по оптимизации и внедрению необходимых изменений [6]. Взаимосвязь этапов и подэтапов осуществляется через последовательную диагностику, идентификацию проблем и выработку рекомендаций. Важно отметить, что каждый этап является основанием для последующего, с учетом предварительных данных и результатов.

1. Подготовительный этап (определение целей и задач, составление команды). Подготовка — это основа для дальнейшей работы. От правильно поставленных целей и задач зависит точность оценки на всех последующих этапах [7]. На этом этапе оценивается, насколько цели аудита согласованы с бизнес-стратегией компании и готовы ли все подразделения к участию. Формула оценки:

$$O_1 = \frac{S_{\text{целей}}}{S_{\text{общ}}} * 100\%,$$

где O_1 — уровень согласованности целей,

$S_{\text{целей}}$ — количество целей, которые соответствуют бизнес-стратегии,

$S_{\text{общ}}$ — общее количество целей, заявленных в документе.

2. Оценка цифровой инфраструктуры. После подготовки и анализа целей аудита, переход к техническому состоянию инфраструктуры компании. Это даст полное представление о ее готовности к трансформации. На этом этапе оценка инфраструктуры проводится с помощью анализа раз-

Таблица 1.

План проведения аудита цифровой зрелости

№	Этап	Задачи	Состав и описание действий	Интерпретация показателей
1	Подготовительный этап	1.1 Определение целей и задач	Формулировка целей аудита в контексте долгосрочной стратегии цифровой трансформации предприятия.	Оценка соответствия задач аудита стратегическим целям организации.
		1.2 Составление команды аудиторов	Формирование команды с экспертами в области цифровой трансформации, информационных технологий и бизнеса.	Качество и опыт участников команды, их совместная работа.
2	Оценка цифровой инфраструктуры	2.1 Анализ IT-инфраструктуры	Оценка текущего состояния сетевых технологий, серверов, программных решений, баз данных и т.д.	Процент обновлений и готовности инфраструктуры к современным цифровым технологиям.
		2.2 Оценка систем безопасности	Анализ существующих систем защиты данных, включая межсетевые экраны, системы обнаружения вторжений и другие решения.	Уровень защиты, соответствие стандартам безопасности.
3	Оценка цифровых процессов	3.1 Автоматизация процессов	Анализ уровня автоматизации процессов в различных подразделениях (финансовых, производственных и других).	Процент автоматизированных процессов, эффективность внедрения технологий.
		3.2 Оценка использования данных	Оценка применения аналитики данных и использования бизнес-анализа в принятии решений.	Уровень зрелости процессов использования данных (от стандартных отчетов до предсказательной аналитики).
4	Оценка цифровой культуры	4.1 Обучение и развитие персонала	Оценка уровня подготовки сотрудников к работе с цифровыми технологиями (курсы, тренинги, семинары).	Процент сотрудников, прошедших обучение, и уровень знаний по цифровым технологиям.
		4.2 Принятие цифровой трансформации	Оценка отношения сотрудников и руководства к внедрению цифровых решений, готовность к изменениям.	Уровень позитивного восприятия и поддержки изменений на всех уровнях организации.
5	Оценка результативности стратегии	5.1 Анализ текущих показателей	Оценка текущей эффективности работы компании с учетом цифровых решений и стратегий.	Выявление коэффициентов производительности, прибыльности и других бизнес-показателей.
		5.2 Прогнозирование и рекомендации	Формулирование прогнозов на основе аудита и рекомендации по улучшению цифровой зрелости предприятия.	Перспективы роста и соответствующие стратегии для повышения цифровой зрелости.

личных компонентов (сети, серверов, программного обеспечения). Формула для оценки:

$$O_2 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i * C_i}{\sum_{i=1}^n w_i * T_i} * 100\%,$$

где O_2 — оценка цифровой инфраструктуры,
 n — количество компонентов инфраструктуры,
 w_i — вес каждого компонента в зависимости от его важности для бизнеса (например, серверы, сети, системы хранения данных),

C_i — коэффициент готовности компонента (например, 1 — готов, 0 — требует модернизации),

T_i — технологический возраст компонента (например, 1 — современное оборудование, 0 — устаревшее оборудование).

3. Оценка цифровых процессов. Для оценки цифровых процессов можно использовать не только количество автоматизированных процессов, но и их сложность и интеграцию в общую цифровую экосистему предприятия [8]. Эта формула учитывает, как степень автоматизации, так и сложность процессов, что позволяет более точно оценить готовность предприятия к цифровым изменениям:

$$O_3 = \frac{\sum_{i=1}^m A_i * D_i}{\sum_{i=1}^m D_i} * 100\%,$$

где O_3 — оценка цифровых процессов,

m — количество процессов, подлежащих автоматизации,

A_i — степень автоматизации процесса (например, 0 — не автоматизирован, 1 — полностью автоматизирован),

D_i — сложность процесса (например, 1 — низкая сложность, 5 — высокая сложность).

4. Оценка цифровой культуры. Культурные аспекты и обучение персонала необходимы для полноценной интеграции цифровых технологий в процессы компании. На этом этапе оценивается, как подготовлены сотрудники и как воспринимаются изменения. Оценка готовности персонала включает анализ обучения и восприятия изменений. Формула для оценки:

$$O_4 = \frac{C_{\text{обучения}}}{C_{\text{общ}}} * 100\%,$$

где O_4 — уровень обучения и восприятия изменений,

$C_{\text{обучения}}$ — количество сотрудников, прошедших обучение,

$C_{\text{общ}}$ — общее количество сотрудников компании.

5. Оценка результативности стратегии. Для оценки результативности стратегии можно использовать не только количество успешных внедрений, но и их влияние на производительность и снижение затрат. Следующая формула помогает оценить, какое именно влияние оказывают внедренные цифровые решения на результаты компании, что является более точным показателем для оценки итоговой результативности стратегии:

$$O_5 = \frac{\sum_{i=1}^q R_i * I_i}{\sum_{i=1}^q I_i} * 100\%,$$

где O_5 — уровень результативности стратегии,

q — количество внедренных цифровых решений,

R_i — результативность внедрения (например, снижение затрат, повышение производительности, улучшение качества обслуживания),

I_i — влияние решения на компанию (например, 1 — значительное влияние, 0.5 — умеренное влияние, 0 — не имеет влияния).

Теперь можно использовать итоговую формулу, которая будет учитывать вес каждого из этапов и их подэтапов. В качестве весов можно использовать значения значимости этапов для достижения цифровой зрелости компании. Вид формулы:

$$O_{\text{итог}} = \frac{w_1 * O_1 + w_2 * O_2 + w_3 * O_3 + w_4 * O_4 + w_5 * O_5}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5},$$

где w_i — вес каждого этапа (например, этап оценки инфраструктуры может иметь больший вес, чем этап оценки культуры),

O_i — оценка каждого этапа.

Для оценки цифровой зрелости предприятия можно использовать шкалу от 1 до 5, где:

1 — На начальной стадии, существенные проблемы в цифровых технологиях и процессах ($O_{\text{итог}} = 0-20\%$).

2 — Слабая готовность, необходимость значительных улучшений ($O_{\text{итог}} = 21-40\%$).

3 — Средний уровень, требует оптимизации и модернизации ($O_{\text{итог}} = 41-60\%$).

4 — Хорошая готовность, но есть область для совершенствования ($O_{\text{итог}} = 61-80\%$).

5 — Высокая зрелость, организация готова к полному внедрению цифровых технологий ($O_{\text{итог}} = 81\%$ и более).

Предложенный план аудита и оценки цифровой зрелости предприятия позволяет системно подходить к оценке готовности организации к цифровой трансформации. Оценка цифровой зрелости на основе предложенной шкалы позволяет глубже понять текущее состояние цифровых технологий и процессов на предприятии и на этой основе выработать план мероприятий по их улучшению. План включает несколько ключевых этапов и подэтапов, каждый из которых направлен на конкретную сферу цифровой зрелости: от технологий и инфраструктуры до корпоративной культуры и стратегии. Каждый этап оценки имеет четкие критерии и показатели, позволяющие детально анализировать текущее состояние и планировать возможные улучшения. При этом автором также разработаны следующие рекомендации по его применению:

1. Рекомендуется проводить регулярную оценку цифровой зрелости предприятия, особенно в условиях быстро меняющихся технологий и рынка. Это поможет своевременно выявлять пробелы и корректировать стратегию цифровой трансформации.
2. Оценка зрелости должна быть не только процедурой для выявления проблем, но и важным инструментом для принятия стратегических решений. Результаты аудита должны быть интегрированы в стратегическое планирование и руководство предприятием.
3. Важно оценивать не только технические и технологические аспекты, но и культурные, органи-

зационные и управленческие. Часто именно эти аспекты могут оказывать значительное влияние на успешность цифровой трансформации.

4. На основе аудита и оценки следует разработать комплексный план мероприятий по повышению зрелости предприятия, который должен включать как технические, так и организационные улучшения.

Заключение

В рамках настоящей статьи был предложен комплексный план проведения аудита и оценки цифровой зрелости предприятия с использованием многоуровневой методики, включающей несколько этапов и подэтапов. План оценивания цифровой зрелости позволяет глубже понять текущее состояние предприятия в контексте цифровой трансформации, систематизировать риски и выявить области для улучшения. Внедрение предложенного

плана аудита позволяет организациям не только диагностировать свою готовность к цифровым изменениям, но и выработать конкретные шаги для совершенствования цифровой инфраструктуры и процессов.

Результаты аудита и интерпретация полученных данных дают возможность для более точного планирования цифровой трансформации и ускорения процесса внедрения цифровых решений. Использование предложенной методики может значительно повысить эффективность цифровых преобразований на предприятиях, что особенно актуально в условиях быстрого развития технологий и глобальных изменений на рынке. Возможность использования предложенной методики на практике открывает новые горизонты для улучшения стратегического планирования и внедрения цифровых решений в организациях разных отраслей, что способствует их конкурентоспособности и инновационности в будущем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Объем продаж российских IT-решений в 2024 году составил 4,5 трлн рублей. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://clck.ru/3JVS9p> (дата обращения 18.03.2025 г.).
2. Курочкина А.А., Намазов К.А. Цифровая трансформация как основное направление эволюции бизнеса: обзор литературы // Прогрессивная экономика. 2023. №7. С. 20–41.
3. Прохорова И.С., Гуреев П.М. Цифровая зрелость бизнеса: технологический разрыв и ограничения цифровой трансформации // Вестник ГУУ. 2023. №4. С. 49–56.
4. Погорельцев А.С., Салимьянова И.Г. Особенности оценки цифровой зрелости организаций // Известия СПбГЭУ. 2022. №5-2 (137). С. 118–125.
5. Краковская И.Н., Корошко Ю.В., Слушкина Ю.Ю. Цифровая зрелость промышленных предприятий: опыт оценки // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2024. №3. С. 433–459.
6. Ершова И.В., Енькова Е.Е. Цифровая зрелость как показатель успешности цифровой трансформации университета // Вестник Университета имени О.Е. Кутафина. 2022. №12 (100). С. 20–29.
7. Лапиков А.В. Оценка цифровой зрелости процесса управления персоналом для организации цифрового перехода компании // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки. 2022. №4 (26). С. 461–471.
8. Семёновых А.М. Оценка уровня цифровизации производственных процессов в контексте повышения эффективности деятельности предприятия // Мировая наука. 2020. №12 (45). С. 262–270.

© Борисенко Даниил Дмитриевич (borisenkodaniil25@gmail.com); Коваленко Клеопатра Дмитриевна
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

О РЕГУЛЯРИЗАЦИИ СРЕДНЕВЗВЕШЕННОГО МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

Галимнуров Артур Альбертович

Аспирант, Уфимский университет науки и технологий
artur.galimnurov@gmail.com

ABOUT REGULARISATION OF THE WEIGHTED AVERAGE MONTE CARLO METHOD

A. Galimnurov

Summary. Within the framework of this paper, we propose a formulation of a regularised variant (RWMLMC) of the weighted multilevel Monte Carlo (WMLMC) method, introducing a penalty term to control the magnitude of the level-dependent weights and stabilise the contribution of the variance between levels. While classical WMLMC can lead to unstable or highly variable weights when inter-level correlations are weak, RWMLMC introduces a tunable regularisation parameter λ that provides robustness and improved generalisation in the presence of noise or unbalanced simulations. We empirically analyse the performance of the proposed method, showing that RWMLMC achieves a better trade-off between cost and variance and improves performance in realistic multilevel sampling regimes.

Keywords: Monte Carlo methods, financial modelling, regularization.

Аннотация. В рамках статьи предлагается формулировка регуляризованного варианта (RWMLMC) метода взвешенного многоуровневого Монте-Карло (WMLMC), вводя штрафной член для контроля величины весов, зависящих от уровня, и стабилизации вклада дисперсии между уровнями. В то время как классический WMLMC может приводить к нестабильным или сильно изменяющимся весам при слабых межуровневых корреляциях, RWMLMC вводит настраиваемый параметр регуляризации λ , который обеспечивает устойчивость и улучшенное обобщение в условиях шума или несбалансированного моделирования. Проведен эмпирический анализ эффективности предложенного метода, показывающий, что RWMLMC достигает лучшего компромисса между стоимостью и дисперсией и повышает эффективность в реалистичных режимах многоуровневой выборки.

Ключевые слова: методы Монте-Карло, финансовое моделирование, регуляризация.

Введение

Численные методы Монте-Карло [1], несмотря на свою долгую историю, переживают сегодня период активного развития и трансформации. За последнее десятилетие эта область математического моделирования обогатилась множеством инноваций, которые значительно расширили сферу применения и эффективность данных методов. Квантовые методы Монте-Карло стали одним из наиболее динамично развивающихся направлений. Внимания заслуживает вспомогательно-полевой квантовый метод Монте-Карло [2], который превратился в мощный инструмент для изучения коррелированных многоэлектронных систем. Метод AFQMC демонстрирует превосходные результаты при моделировании сложных квантовых систем с сильными электронными корреляциями, что делает его незаменимым в современной квантовой химии и физике конденсированного состояния. Параллельно с этим активно развиваются квантово-ускоренные многоуровневые методы Монте-Карло, где квантовые вычисления используются для повышения эффективности многоуровневых симуляций. Согласно опубликованным результатам исследований, эти методы позволяют существенно снизить вычислительную сложность при решении задач со стохастическими дифференциальными уравнениями.

Значительный теоретический прорыв представляют квази-методы Монте-Карло высшего порядка (HoQMC). Данное направление [3] развивает идеи, заложенные в классических квази-методах Монте-Карло, но позволяет достичь гораздо лучшей скорости сходимости при численном интегрировании гладких функций. В статье [4] авторы демонстрируют, как применение цифровых сетей и последовательностей высшего порядка позволяет достичь более быстрого уменьшения ошибок по сравнению с традиционными методами. Эти теоретические достижения уже находят применение при решении дифференциальных уравнений с случайными коэффициентами и в задачах байесовской оценки, где может быть использована гладкость интегранда. Примечательны также инновации в области методов Марковской цепи Монте-Карло (MCMC). Регенеративный алгоритм Улама-фон Неймана, описанный в недавней работе [5], представляет собой оригинальное расширение классических методов MCMC для обращения матриц. Введение регенеративной структуры позволяет преодолеть традиционный компромисс между длиной цепи и количеством повторений, что существенно повышает точность и эффективность матричных вычислений. Экспериментальные результаты показывают, что данный подход позволяет значительно снизить дисперсию и вычислительные затраты при численном моделировании. В этом же на-

правлении развиваются продвинутые методы МСМС для задач линейной алгебры, включая обращение разреженных матриц и предобуславливание. Исследования, опубликованные в [6] демонстрируют, как применение параллелизации и гибридных алгоритмов может повысить масштабируемость и производительность на современных ускорителях вычислений. Недавно разработанный метод [7] для аппроксимации постохастических выходных данных в моделях статистического вывода без использования априорных знаний представляет особый интерес. Данный подход решает вычислительные проблемы в байесовских системах, свободных от априорных распределений, путем аппроксимации кредитного множества как смеси распределений. Метод демонстрирует значительное сокращение вычислительного времени при сохранении точности, что делает его подходящим для таких сложных задач статистического вывода, как логистическая регрессия и полупараметрическое моделирование. В контексте машинного обучения и оптимизации стратегий методы Монте-Карло также нашли новые применения. Алгоритм, описанный в статье [8], использует моделирование Монте-Карло для измерения долгосрочного ожидаемого вознаграждения от различных действий, что позволяет существенно снизить ошибки в процессах принятия решений. Этот подход успешно реализован в таких областях, как игровой искусственный интеллект, и демонстрирует значительный потенциал для более широкого применения в системах адаптивного управления. Интеграция искусственного интеллекта с симуляциями Монте-Карло представляет еще одно перспективное направление развития. Инструменты, подобные AutoFLUKA, описанному в работе [9], автоматизируют рабочие процессы в системе моделирования FLUKA за счет использования больших языковых моделей. Это позволяет снизить необходимость ручного вмешательства, оптимизировать процессы и повысить масштабируемость симуляций. Такие инновации имеют особую ценность в областях, где распространены сложные симуляции, например, в медицинской физике и ядерной инженерии. Таким образом, современное развитие численных методов Монте-Карло характеризуется глубокими теоретическими инновациями и широким спектром практических приложений. От квантовых вычислений до автоматизации с помощью искусственного интеллекта эти разработки существенно расширяют возможности и повышают эффективность методов Монте-Карло в различных научных дисциплинах.

Теоретический анализ

Взвешенный многоуровневый метод Монте-Карло (MLMC) — это передовая вычислительная техника, представленная научному сообществу в конце 2024 года [10], направленная на повышение эффективности при решении стохастических задач. Метод MLMC по своей сути является техникой уменьшения дисперсии, предназначен-

ной для эффективной оценки математических ожиданий функционалов в стохастических системах. Он работает за счёт использования нескольких уровней разрешения, комбинируя симуляций на различных уровнях точности, где грубые уровни менее точны, но требуют меньше вычислительных ресурсов, а точные уровни обеспечивают большую точность, но более затратны вычислительно. Взвешенный вариант MLMC вводит веса [10], позволяющие оптимизировать распределение вычислительных ресурсов между уровнями, что дополнительно снижает дисперсию и повышает эффективность оценки. Одним из ключевых достижений такого метода является возможность оценки и контроля функции дисперсии. Так недавние исследования применили взвешенный MLMC к оценке функции дисперсии в стохастических симуляциях, как описано в статье [11]. Данный подход динамически адаптирует точки проектирования и вычислительный бюджет на каждом уровне. Демонстрирует асимптотическую нормальность при определённых условиях. Достигает значительно более высокой вычислительной эффективности по сравнению со стандартными методами Монте-Карло.

Метод представленный в этой работе является обобщением метода [10], поэтому в рамках этой статьи мы будем оперироваться такой же нотификацией.

Рассмотрим уровни $l = 0, 1, \dots, L$. Пусть P_l — оценка на уровне l , — вес уровня l . Тогда в методе WMLMC зададим:

$Y_l^0 = P_l - \theta_l \cdot P_l^{l-1}$, где P_l^{l-1} — соответствующая оценка на уровне $l-1$.

И заметим, что взвешенный оценщик уровня l задается рекурсивно:

При этом, стоимость и дисперсия на уровне l выражаются рекурсивно [10] как:

$$(E_l^0)^2 = \alpha_l \eta_l^2 + \beta_l^2 (E_{l-1}^0)^2 \quad (1)$$

$$(v_l^0)^2 = \sigma_l^2 - 2\theta_l \rho_l \sigma_l \sigma_{l-1} + \theta_l^2 \sigma_{l-1}^2 \quad (2)$$

Где α, β — коэффициенты регрессии, $\alpha, \eta, \sigma, \rho$ — число траекторий и дисперсия разности между уровнями соответственно.

В рамках данной статьи предлагается рассмотреть задачу минимизации следующей регуляризированной функции:

$$J(\theta_l) = (E_l^0)^2 + \lambda (v_l^0)^2, \quad (3)$$

где λ — параметр регуляризации

Утверждение 1.

Пусть $\lambda > 0$. Тогда оптимальный вес $\theta_i^* = B / A$ минимизирует функцию $J(\theta_i)$, а соответствующий оценщик P_i^0 обладает пониженной чувствительностью к колебаниям в η_i, σ_i, ρ_i по сравнению со стандартной схемой без регуляризации $\lambda = 0$.

Доказательство. Подставляя выражения (1) и (2) в (3) получаем:

$$J(\theta_i) = A\theta_i^2 - 2B\theta_i + C. \quad (4)$$

Где

$$A = \beta_i^2 (E_{i-1}^0)^2 + \lambda \sigma_i^2, \quad B = \lambda \rho_i \sigma_i \sigma_{i-1}, \quad C = \alpha_i \eta_i^2 + \lambda \sigma_i^2$$

Получается, что $J(\theta_i)$ является строго выпуклой квадратичной функцией по θ_i при $A > 0$, что гарантировано при $\lambda > 0$.

Отсюда минимум есть $\theta_i^* = B / A$.

Чтобы доказать пониженную чувствительность к колебаниям η_i, σ_i, ρ_i , нужно доказать, что найденный минимум при небольших изменениях η_i, σ_i, ρ_i меняется меньше, чем в случае с $\lambda = 0$. Это доказывается с помощью прямого дифференцирования по параметрам.

Одной из главных мотивацией для улучшения методов Монте-Карло является стремление к уменьшению количества вычислений при заданной точности.

Одноуровневая оценка Монте-Карло требует $O(\varepsilon^{-3})$ для достижения общей ошибки ε [10]. Метод MLMC предлагает способ улучшить эту ситуацию за счет комбинаций оценки на самом тонком уровне с разностью оценок на более грубых уровнях, генерируя больше образцов на более грубых, дешевых уровнях и меньшее количество на более тонких, дорогих уровнях. В результате получается метод со смещением самого тонкого уровня, но потенциально гораздо меньшей дисперсией при заданных вычислениях, а вычислительные затраты могут быть даже ниже $O(\varepsilon^{-2})$. Метод WMLMC несмотря на то, что является усложнением MLMC все еще требует $O(\varepsilon^{-2})$ вычислений [10]. Оценим, насколько более требовательным к вычислениям является предлагаемый метод RWMLMC. Так как оптимальные веса θ^* выражаются аналитически, то для L уровней количество дополнительных по сравнению с WMLMC вычислений составит $O(L)$. Из этой идеи следует более полное утверждение.

Утверждение 2. (Сложность алгоритма)

Регуляризация не увеличивает асимптотическую сложность по сравнению с WMLMC, и сложность RWMLMC ограничивается $O(\varepsilon^{-2})$.

Эмпирический анализ

Предложенный метод RWMLMC является обобщением WMLMC и при $\lambda=0$ совпадает с WMLMC. При этом, несмотря на небольшое увеличение стоимости вычислений из-за решения задачи минимизации в части прикладных задач метод может давать лучшие результаты. В рамках работы был проведен анализ эффективности RWMLMC против WMLMC в двух случаях. Первая задача — оценка денежного потока структурированной облигации с триггером, активирующим выплату только при достижении определённого уровня процентной ставки. Выплата зависит от того, пересекла ли процентная ставка заданный порог за весь период до погашения. Такая ситуация характерна для продуктов с барьерными условиями. Проблема заключается в том, что функция выплаты имеет скачок: даже незначительное изменение траектории процентной ставки около барьера может полностью изменить результат — от нуля до полной выплаты. Вторая задача — классическая оценка VaR портфеля облигаций.

Итак, эмпирические данные показывают, что RWMLMC становится более эффективным при определенных условиях, например, как в первой задаче с нестандартной выплатой купонов. Во-первых, когда стандартные веса MLMC сильно колеблются, либо очень малы, либо велики, регуляризация стабилизирует процесс оценки. Во-вторых, если межуровневая корреляция высока, но изменяется неравномерно по уровням, регуляризация сглаживает переход весов, избегая нестабильных скачков, которые могут привести к смещенным или высоковариационным оценкам. В-третьих, для задач с большим количеством уровней регуляризация помогает накопить структуру и избежать распространения численной неустойчивости. Наконец, когда стоимость дискретизации резко возрастает на более глубоких уровнях, регуляризация снижает риск перераспределения выборок на дорогие уровни из-за зашумленности весовых оценок. На рис. 1 продемонстрирован пример, как ведут себя WMLMC и RWMLMC для первой задачи.

С другой стороны есть случаи, как например во второй задаче, когда дисперсия RWMLMC больше чем WMLMC, что делает его менее эффективным. Одной из основных причин увеличения дисперсии в RWMLMC является слишком агрессивная регуляризация. Параметр λ действует как штраф на большие межуровневые веса, заставляя оптимальные веса θ стремиться к нулю. В результате оценщик теряет структурное преимущество многоуровневой телескопической суммы, где коррелированные различия между мелкими и крупными уровнями нивелируют дисперсию. Когда λ слишком велика, регуляризация подавляет этот механизм уменьшения дисперсии, что приводит к увеличению общей дисперсии. Второй фактор, способствующий этому, — слабая корреляция между уровнями. Когда межуровне-

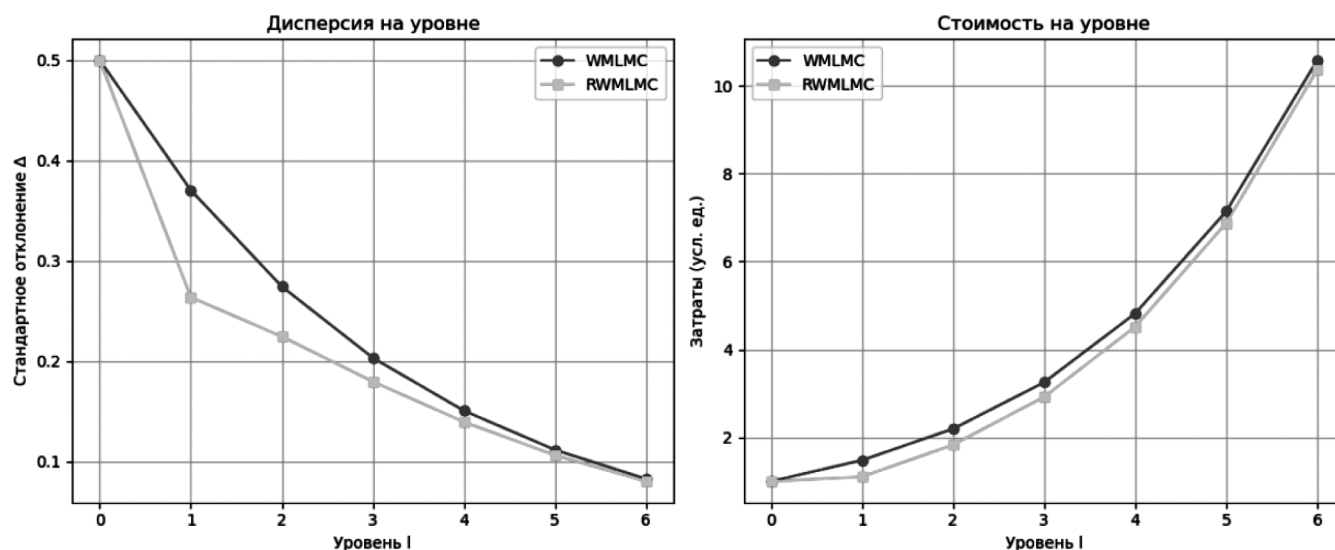


Рис. 1. Пример эффективности RWMLMC в случае

вая корреляция уже мала, оптимальные веса в WMLMC естественно малы, и любое дополнительное сокращение с помощью регуляризации только усугубляет дисперсию. В-третьих, сама схема сравнения может повлиять на интерпретацию. Если фиксировать целевую дисперсию, но при этом не фиксировать бюджет вычислений, регуляризованная оценка может показаться хуже просто потому, что она жертвует дисперсией в пользу стабильности или робастности. Напротив, если целью является оптимизация компромисса между ошибкой и стоимостью, RWMLMC может оказаться лучше за счет лучшей стабильности на единицу стоимости, особенно в шумных или нестабильных режимах. Регуляризация по своей сути не гарантирует меньшую дисперсию, но она вводит полезные ограничения, которые могут улучшить устойчивость оценщика, особенно в условиях сильного шума, при наличии нестабильных или колебательных весовых моделей, или когда требуется настройка MLMC на основе данных. Следует отметить, что хотя RWMLMC иногда может давать несколько большую дисперсию, чем WMLMC при наивном сравнении, он дает

преимущества в плане численной устойчивости, интерпретируемости, робастности и экономичности в сложных или высокоразмерных стохастических системах.

Заключение

В данной работе автор представил обобщение взвешенного много-порогового метода Монте-Карло, за счет введения штрафа за оценку дисперсии. Праведно утверждение, формализующие аналитический поиск оптимальных весов при заданном параметре регуляризации и утверждения об вычислительной оценке предложенного обобщения. Эмпирические результаты, полученные в ходе исследования, продемонстрировали, что предложенная модель в определенных задачах превосходит WMLMC.

Таким образом, предложенный подход имеет не только прочную теоретическую основу, но и демонстрирует практическую эффективность, что делает её ценным инструментом оценки финансовых инструментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. J.-C. Walter, G.T. Barkema, An introduction to Monte Carlo methods // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2015, Vol. 418, pp. 78–87, URL: doi.org/10.1016/j.physa.2014.06.014.
2. J. Lee, Q. Hung, D. Reichman, Twenty Years of Auxiliary-Field Quantum Monte Carlo in Quantum Chemistry: An Overview and Assessment on Main Group Chemistry and Bond-Breaking // 2022, URL: doi.org/10.48550/arXiv.2208.01280
3. Dick, Josef, Gantner, Robert N., Multilevel higher-order quasi-Monte Carlo Bayesian estimation // *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 2017, URL: doi.org/10.1142/S021820251750021X
4. T. Goda, K. Suzuki Recent advances in higher order quasi-Monte Carlo methods // 2019, URL: doi.org/10.48550/arXiv.1903.12353
5. S. Ghosh, L. Horesh, V. Kalantzis, Y. Lu, T. Nowicki // 2024, URL: doi.org/10.48550/arXiv.2407.16661
6. A. Lebedev, V. Alexandrov // 2024, URL: doi.org/10.48550/arXiv.2409.03095v1
7. R. Martin, No-prior Bayesian inference reImagined: probabilistic approximations of inferential models // 2025, URL: doi.org/10.48550/arXiv.2503.19748
8. G. Tesaro, G. R. Galperin On-line Policy Improvement using Monte-Carlo Search // 2025, URL: doi.org/10.48550/arXiv.2501.05407
9. Z. Ndum, J. Tao, J. Ford, Y. Liu AutoFLUKA: A Large Language Model Based Framework for Automating Monte Carlo Simulations in FLUKA // 2024, URL: doi.org/10.48550/arXiv.2410.15222
10. Yu Li, A. Ware A WEIGHTED MULTILEVEL MONTE CARLO METHOD // 2024, URL: doi.org/10.48550/arXiv.2405.03453
11. J. Zhang, Xi Chen, Multilevel Monte Carlo Metamodeling for Variance Function Estimation // 2025, URL: doi.org/10.48550/arXiv.2503.19294v1

© Галимнуров Артур Альбертович (artur.galimnurov@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.05-2.07

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАПРОСОВ ИЗМЕНЕНИЯ И УДАЛЕНИЯ В NOSQL И ОБЪЕКТНО-РЕЛЯЦИОННОЙ БАЗЕ ДАННЫХ

ESTIMATION OF EXECUTION TIME FOR MODIFICATION AND DELETION QUERIES IN NOSQL AND OBJECT-RELATIONAL DATABASE

**B. Goryachkin
A. Alekseev**

Summary. Problem statement. To store different types of data, different databases are used, operations to which are performed at different speeds. It is necessary to optimize the execution time of user queries to different databases.

Goal. To increase the efficiency of user interaction with different types of databases.

Results. The time of operations for changing and deleting data from different types of databases is considered, depending on the amount of data, as well as the type of data.

Practical significance. The data was obtained and recommendations for the use of databases were developed based on them, depending on their number and types. This will allow you to select the most efficient databases and distribute data across them on a case-by-case basis.

Keywords: lots of databases, PostgreSQL, Cassandra, MongoDB, Neo4j.

Горячкин Борис Сергеевич

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

Алексеев Андрей Сергеевич

Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана
asalexeev2001@mail.ru

Аннотация. Постановка проблемы. Для хранения разнотипных данных используются различные базы данных, операции к которым выполняются с разной скоростью. Необходимо оптимизировать время выполнения запросов пользователя к разным базам данных.

Цель. Повысить эффективность взаимодействия пользователя с разнотипными базами данных.

Результаты. Рассмотрено время проведения операций изменения и удаления данных из разнотипных баз данных в зависимости от количества данных, а также типа данных.

Практическая значимость. Получены данные и разработаны на их основе рекомендации по использованию баз данных в зависимости от их количества и типов. Это позволит выбрать наиболее эффективные базы данных и распределение данных по ним в каждом конкретном случае.

Ключевые слова: множество баз данных, PostgreSQL, Cassandra, MongoDB, Neo4j.

Введение

В настоящее время наблюдается продолжающийся рост систем, поддерживающих огромный объем реляционных и нереляционных форм данных. Примерами моделей данных, которые поддерживают многомодельные базы данных, являются документные, графические, реляционные и колоночные модели. Эти модели используются для решения различных задач и оптимизации работы с данными в зависимости от их структуры, объема и требований к обработке. Каждая модель данных имеет свои преимущества и подходит для конкретных сценариев использования. Поэтому необходимо знать в каких базах данных наиболее быстрые запросы для определенных типов данных.

Постановка задачи

В рамках данного исследования будет осуществлен анализ NoSQL и объектно-реляционных систем управления базами данных, каждая из которых имеет свои уникальные достоинства и недостатки [1]. Главная цель

исследования заключается в выявлении наиболее эффективной системы управления базами данных через сравнительный анализ времени выполнения запросов на изменение и удаление, в графовой (Neo4J), документной (MongoDB), объектно-реляционной (PostgreSQL) и колоночной (Cassandra) системах для кластеров баз данных [2], [3], а также сравнительный анализ времени выполнения запросов при изменении количества столбцов (PostgreSQL), полей (MongoDB), колонок (Cassandra), атрибутов (Neo4J) и их типов данных.

Практический эксперимент проводится на операционной системе Ubuntu. Поскольку СУБД выбирается не под какую-то конкретную тему, то для эксперимента была создана БД, содержащая информацию о блюдах, пользователях и их заказах.

Описание работы БД

База данных (БД) — это структурированная система для хранения, организации и управления данными.

В контексте аналитики БД используется для хранения больших объемов данных, которые затем анализируются для извлечения полезной информации, принятия решений и прогнозирования.

Основные компоненты БД:

1. **Таблицы:** Основные структуры для хранения данных. Данные организованы в строки (записи) и столбцы (поля).
2. **Индексы:** Структуры, ускоряющие поиск данных в таблицах.
3. **Запросы:** Команды на языке SQL (или другом языке запросов), которые извлекают, изменяют или удаляют данные.
4. **Транзакции:** Группы операций, которые выполняются как единое целое (например, вставка, обновление, удаление).
5. **Репликация и шардирование:** Механизмы для масштабирования и повышения отказоустойчивости БД.

Аналитика на основе БД:

1. **Агрегация данных:** Подсчет сумм, средних значений, максимумов, минимумов и других метрик.
2. **Фильтрация данных:** Выборка данных по определенным критериям (например, временной интервал, категория).
3. **Группировка данных:** Анализ данных по группам (например, по пользователям, регионам).
4. **Визуализация данных:** Представление данных в виде графиков, диаграмм и отчетов.

Модельное время выполнения запросов

Время выполнения запросов зависит от множества факторов, включая объем данных, сложность запроса, производительность сервера БД, наличие индексов и оптимизацию запросов. Ниже приведены примеры модельного времени выполнения для различных типов запросов.

1. Простой SELECT-запрос (поиск по индексу)

Пример запроса: `SELECT * FROM users WHERE id = 12345;`

Время выполнения: $O(\log n)$, где n — количество записей в таблице.

2. SELECT-запрос с фильтрацией (без индекса)

Пример запроса: `SELECT * FROM users WHERE age > 30;`

Время выполнения: $O(n)$, где n — количество записей в таблице.

3. Агрегация данных (GROUP BY)

Пример запроса: `SELECT country, COUNT(*) FROM users GROUP BY country;`

Время выполнения: $O(n)$, где n — количество записей в таблице.

4. JOIN-запрос (соединение таблиц)

Пример запроса: `SELECT u.name, o.order_id FROM users u JOIN orders o ON u.id = o.user_id;`

Время выполнения: $O(n * m)$, где n и m — количество записей в таблицах `users` и `orders`.

5. Сложный аналитический запрос (оконные функции)

Пример запроса: `SELECT user_id, SUM(amount) OVER (PARTITION BY user_id ORDER BY date) AS running_total FROM transactions;`

Время выполнения: $O(n \log n)$, где n — количество записей в таблице.

Факторы, влияющие на время выполнения запросов

- Объем данных: Чем больше данных, тем дольше выполняется запрос.
- Индексы: Наличие индексов значительно ускоряет поиск и фильтрацию данных.
- Сложность запроса: Запросы с JOIN, GROUP BY, оконными функциями выполняются дольше.
- Производительность сервера: Скорость CPU, объем оперативной памяти и тип хранилища (HDD/SSD) влияют на время выполнения.
- Параллелизм: Возможность выполнения запросов в параллельном режиме (например, в распределенных БД).
- Кэширование: Кэширование результатов запросов может значительно ускорить повторное выполнение.

Определение аналитической зависимости времени выполнения запроса от его параметров

Учитывая, что в практических системах баз данных имеется как минимум несколько тысяч записей, вычисления аналитических зависимостей времени выполнения запросов от числа обрабатываемых строк будут проводиться при условии, что количество строк превышает 1000. Кроме того, в реальных системах запросы к базам данных обрабатываются на нескольких серверах, что требует учета времени распределения и передачи к серверам.

Время выполнения запроса к базе данных $\tau_{\text{запр}}$ рассчитывается по следующей формуле (1):

$$\tau_{\text{запр}} = \tau_{\text{обращ}} + \tau_{\text{расп}} + \tau_{\text{выполн}}, \quad (1)$$

где $\tau_{\text{обращ}}$ — это время, которое требуется для передачи запроса к базе данных и получения ответа от нее. Оно зависит от скорости сетевого соединения между приложением и базой данных; $\tau_{\text{расп}}$ — это время, которое требуется для распределения запроса между серверами; $\tau_{\text{выполн}}$ — это время, затраченное на выполнение самого запроса в сервере базы данных. Оно зависит от сложности запроса, объема данных и индексации.

Так как передача запроса и получение ответа происходят в одной и той же среде время передачи запроса и время получения ответа будут равны. Таким образом $\tau_{\text{обращ}}$ можно представить, как формулу 2:

$$\tau_{\text{обращ}} = 2 * \tau_{\text{пути}}, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{пути}}$ — это время пути запроса к базе данных.

Время выполнения запроса в сервере базы данных ($\tau_{\text{выполн}}$) равен сумме параметров, указанных в формуле 3:

$$\tau_{\text{выполн}} = \tau_{\text{диск}} + \tau_{\text{индекс}} + \tau_{\text{СУБД}}, \quad (3)$$

где $\tau_{\text{диск}}$ — время чтения с диска в оперативную память. Оно зависит от количества записей в таблице; $\tau_{\text{индекс}}$ — время выполнения, которое экономит использование индексов при запросе к серверу [4], [5]. Оно зависит от разных типов индексов; $\tau_{\text{СУБД}}$ — время стартовой задержки выполнения запроса сервером, которое зависит от категории СУБД и особенностей моделей данных.

На Рисунке 1 показана обобщенная схема выполнения запроса.

При изменении и удалении данных через API приложение взаимодействует с системой управления базами данных (СУБД), где координатор распределяет запросы между серверами [6]. СУБД передает запрос к базе данных, которая, в процессе чтения данных, обращается к дисковому накопителю, а затем, при наличии данных в кэш-памяти, использует ее. В случае выполнения операции записи обращение осуществляется к оперативной памяти с последующим просмотром необходимой информации в кэш-памяти.

Определим время выполнения запроса, основываясь на построении непрерывной функции с учетом промежуточных значений, используя формулы (1), (2) и (3). В случае значительного расхождения между экспериментальным и теоретическим временем выполнения запроса будет применен поправочный коэффициент.

Представим формулы, которые описывают процесс определения времени выполнения запроса для всех систем управления базами данных. Для запроса 1 (изменение данных) зависимость можно выразить формулами (4) — (7), где N обозначает количество строк в таблице.

В результате проведенных экспериментов было зафиксировано время передачи запроса от приложения к базе данных, а также время возвращения запроса от базы данных к приложению ($\tau_{\text{пути}}$) — 0,6 мс. Кроме того, было установлено время, затраченное координатором на распределение запроса по конкретному серверу ($\tau_{\text{расп}}$) — 0,5 мс.

Время чтения данных с диска в оперативную память ($\tau_{\text{диск}}$), представленное в формулах (4) — (11), описывается многочленом, который зависит от числа записей в таблице. Время обработки запроса сервером ($\tau_{\text{индекс}}$) в данном эксперименте считается равным нулю, поскольку индексация в базе данных не проводилась. В противном случае это время могло бы оказаться отрицательным, так как наличие индексов сокращает время выполнения запроса.

В связи с тем, что в аналитической зависимости имеется определенная погрешность, в параметре $\tau_{\text{СУБД}}$ введен корректирующий коэффициент, который уменьшает расхождение между $\tau_{\text{ЭКСП}}$ и $\tau_{\text{запр}}$.

Ниже представлены аналитические зависимости запроса на изменение для случаев, когда количество строк превышает 1000, количество строк не увеличено и типы данных строк не изменены (формулы (4) — (7)), основанные на формулах (1), (2) и (3), предназначенные для оценки эргономичности времени выполнения запроса. Формулы были выведены с применением метода регрессии для приближения функции с одной переменной [7] [8].

Методика проведения экспериментальных исследований производительности БД

При высокой нагрузке на один сервер целесообразно распределить её между несколькими серверами, организовав кластер. Применение кластерных систем управления базами данных и развертывание кластера баз данных на нескольких серверах позволяют снизить нагрузку на отдельные серверы и ускорить время обработки запросов [9].

В ходе практического эксперимента мы соберем данные для определения зависимости времени выполнения запроса от размера базы данных, процента записей, соответствующих заданному условию, количества полей, включенных в запрос, категории системы управления базами данных, количества столбцов в таблицах, типов данных столбцов, а также особенностей модели данных.

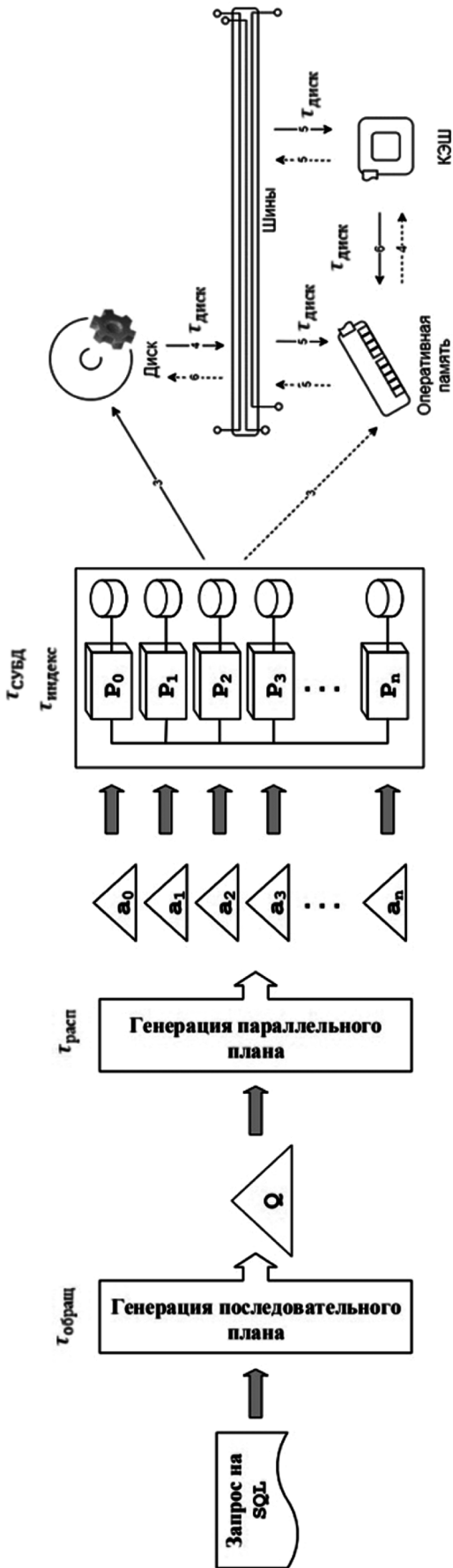


Рис. 1. Упрощенная схема выполнения запроса

В базе данных для проведения эксперимента находятся сущности User, Order и Dish, содержащие от 1 до 100000000 записей. Запросы включали операции изменения и удаления данных в каждой из трёх сущностей с целью анализа времени их выполнения. При проведении экспериментов с большими объемами данных (более 1000 строк) без изменения структуры базы данных наиболее производительна СУБД Cassandra. Худшее время показывает СУБД PostgreSQL. Такие же эксперименты были проведены для запросов на изменение и удаление к таблицам, где были изменены количество столбцов или типы данных. В случаях увеличения количества столбцов и изменения их типа на integer соотношение эффективности обработки запросов между СУБД не изменяются. В случае изменения типа столбцов на character varying СУБД Cassandra становится худшей, а СУБД Neo4J лучшей для выполнения обоих запросов.

Сравнение экспериментального и расчетного времени

После сравнения полученного времени выполнения запросов изменения и удаления для четырех СУБД при числе строк более 1000 было вычислено, что максимальная средняя ошибка аппроксимации в 16 % и 11 %. Эта ошибка является приемлемой. При анализе максимального объема данных, составляющего 100000000 строк, это означает, что 16 % и 12 % от минимального времени выполнения запроса составят соответственно 3,840 мс и 1578,77 мс. Эти значения превышают время, необходимое для зрительного восприятия человека (0,9–0,95 с). Однако, принимая во внимание латентный период реакции человека, мы считаем такие показатели удовлетворительными [10].

Таким образом, результаты, полученные на основе аналитической зависимости для запросов 1 и 2 при количестве строк свыше 1000, являются приемлемыми. Непрерывные функции, представленные в формулах (4) — (11), позволяют оценить время выполнения запросов на изменение и удаление данных с максимальной погрешностью в 16 %.

Заключение

В рамках исследования были проведены эксперименты для оценки времени выполнения запросов на изменение и удаление данных в четырех различных системах управления базами данных (СУБД). На основе полученных результатов разработаны рекомендации по выбору наиболее эффективной СУБД для работы с аналогичными базами данных. Установлено, что как в случае операций изменения, так и при удалении данных документная СУБД Cassandra демонстрирует наименьшее время выполнения запросов.

В данной работе также представлены формулы, описывающие аналитические зависимости времени выполнения запросов в зависимости от типа системы управления базами данных (СУБД) и объема данных в таблицах. Установлено, что результаты расчетов в значительной степени соответствуют экспериментально полученным данным. Авторы предлагают в качестве направлений для будущих исследований более детальный анализ аналитической зависимости для колоночных СУБД, а также дополнительные исследования, касающиеся использования индексов в запросах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградова М.В. «Постреляционные базы данных» Подготовительный материал. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023.
2. Григорьев Ю.А. Оценка времени выполнения SQL-запросов к базам данных // Машиностроение и компьютерные технологии. 2012. №01.
3. Григорьев Ю.А., Ермаков Е.Ю. Анализ времени выполнения запроса в параллельном колоночном хранилище данных // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. №11 (23).
4. Виноградова М.В., Барашкова Е.С., Березин И.С., Ореликов М.Г., Лузин Д.С. Обзор системы полнотекстового поиска в постреляционной базе данных PostgreSQL // E-Scio. 2020. № 5 (44).
5. Морозов С.В., Нестеров С.А. Сравнительный анализ типов индексов в СУБД SQL Server И Postgresql. // Системный анализ в проектировании и управлении. 2024.
6. Плужников В.Л. Оценка времени выполнения запросов в параллельной системе баз данных // Машиностроение и компьютерные технологии. 2011. №06.
7. Бутырский Е.Ю., Кувалдин И.А., Чалкин В.П. Аппроксимация многомерных функций // НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, 2010, том 20, № 2, с. 82–92
8. Онлайн калькуляторы PLANETCALC. URL: <https://planetcalc.ru/5992/> (дата обращения: 10.12.2024).
9. Григорьев Ю.А., Плужников В.Л. Алгоритм выбора архитектуры параллельной системы баз данных по критерию стоимости // Машиностроение и компьютерные технологии. 2011. №12.
10. Горячкин Б.С. Эргономический анализ систем обработки информации и управления // Вестник евразийской науки. 2017. Т. 9. №3. С. 72.

© Горячкин Борис Сергеевич (bsgor@mail.ru); Алексеев Андрей Сергеевич (asalexeev2001@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ УГРОЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ВОЗНИКАЮЩИХ НА ФИЗИЧЕСКОМ И КАНАЛЬНОМ УРОВНЯХ

A TECHNIQUE FOR INCREASING THE STABILITY OF OPTICAL TRANSPORT COMMUNICATION NETWORKS IN THE CONTEXT OF INFORMATION SECURITY THREATS ARISING AT THE PHYSICAL AND CHANNEL LEVELS

**S. Grishchenko
A. Ivanin**

Summary. The article discusses a technique for increasing the stability of special-purpose optical transport communication networks (STS SN) in the context of information security threats. An integrated approach based on the use of machine learning methods and hidden Markov models (SMM) is proposed, which reduces the time required to detect attacks at the physical and channel levels. A model of the network status and attack classification has been developed, as well as an algorithm for taking preventive measures. The results obtained contribute to improving the survivability and reliability of networks within the critical information infrastructure.

Keywords: stability, information security, optical transport networks, neural networks, hidden Markov model, EMVOS, critical information infrastructure.

Грищенко Сергей Сергеевич

Адъюнкт, Военная академия связи

им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного
sergeogri@yandex.ru

Иванин Андрей Николаевич

к.т.н, докторант, Военная академия связи

им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного
andreiivanin@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается методика повышения устойчивости функционирования оптических транспортных сетей связи специального назначения (ОТСС СН) в условиях реализации угроз информационной безопасности. Предложен комплексный подход, основанный на применении методов машинного обучения и скрытых марковских моделей (СММ), обеспечивающий сокращение времени обнаружения атак на физическом и канальном уровнях. Разработана модель состояния сети и классификации атак, а также алгоритм принятия превентивных мер. Полученные результаты способствуют повышению живучести и надежности сетей в рамках критической информационной инфраструктуры.

Ключевые слова: устойчивость, информационная безопасность, оптические транспортные сети, нейронные сети, скрытая марковская модель, ЭМВОС, критическая информационная инфраструктура.

Современные оптические транспортные сети связи специального назначения (ОТСС СН) являются основой высоконадежной и высокоскоростной передачи данных. Однако реализация угроз информационной безопасности (ИБ) посредством сетевых и компьютерных атак становится реальным инцидентом, способным нанести ущерб информационным системам за счет нарушения конфиденциальности, целостности и доступности [1], что имеет непосредственное влияние на одно из ключевых требований к ОТСС — устойчивость [2].

В настоящее время множество работ посвящено изучению возможности точного обнаружения и прогнозирования сетевых и компьютерных, добившихся существенных результатов [3].

Однако прямое применение данных методов к ОТСС СН не учитывает особенность ее построения и функцио-

нирования, а также плохо интегрируется напрямую с таким показателем как устойчивость:

1. Существующие способы обнаружения сетевых и компьютерных атак, хорошо работают на сетевом уровне и выше ЭМВОС [4], и не затрагивают физический и канальный уровень, это обусловлено принятием факта того, что злоумышленник находится внутри сети связи и для проведения сетевых и компьютерных атак, ему нет необходимости преодолевать первые два уровня. Такой подход разрушает концепцию сетей связи специального назначения функционирующих как часть объектов критической информационной инфраструктуры, а размещения его телекоммуникационного оборудования происходит только в пределах контролируемых зон.
2. Основной целью ИБ сетей связи, является обеспечение устойчивости их функционирования [1], но прямое интегрирование показателя информа-

ционной безопасности в устойчивость, будет вести не только к ужесточению требований к ОТСС СН, но и способствовать снижению общего показателя устойчивости, делая его более пессимистическим.

В контексте современных вызовов информационной безопасности, устойчивость оптических транспортных сетей связи специального назначения (ОТСС СН) становится критически важным аспектом их функционирования. Традиционные методы обеспечения устойчивости, основанные на повышении надежности и живучести сети, не всегда учитывают специфику угроз, возникающих на физическом и канальном уровнях. Это создает уязвимости, которые могут быть использованы злоумышленниками для нарушения конфиденциальности, целостности и доступности передаваемых данных. В связи с этим возникает необходимость разработки новых подходов, которые не только повышают вероятность сохранения работоспособности сети, но и минимизируют время обнаружения и нейтрализации угроз, что особенно важно для сетей, функционирующих в рамках критической информационной инфраструктуры.

Устойчивость функционирования ОТСС СН имеет вероятностный характер и оценивается на основе показателей живучести и надежности. Живучесть выражается как коэффициент оперативной готовности ($K_{ог}$), а надежность — коэффициент готовности (K_r)

$$K_{ог} = P(T)K_r \quad (1)$$

$$K_r = T_o / (T_o + T_b),$$

где $P(T)$ — вероятность сохранения работоспособности в результате внешних дестабилизирующих факторов, T_o — время наработки на отказ, T_b — время восстановления работоспособности.

В данной работе предлагается методика повышения устойчивости ОТСС СН не за счет увеличения вероятности сохранения работоспособности, а путем сокращения времени обнаружения угроз на физическом и каналь-

ном уровнях, рисунок 1, и оперативного принятия мер по их предотвращению.

Если вероятность сохранения работоспособности сети постоянна, коэффициент оперативной готовности определяется коэффициентом готовности, который зависит от времени наработки на отказ и времени восстановления.

В свою очередь время восстановления можно определить циклом восстановления:

$$T_b = T_{обнр} + T_{увед} + T_{прреш} + T_{рем} \quad (2)$$

где $T_{обнр}$ — время обнаружения воздействия, $T_{увед}$ — время уведомления, $T_{прреш}$ — время принятия решения, $T_{рем}$ — время на ремонтные работы (принятие мер).

В данной работе предлагается использовать метод повышения устойчивости ОТСС СН не за счет повышения вероятности сохранения работоспособности $P_p(t)$, а за счет сокращения времени обнаружения угроз информационной безопасности на физическом и канальном уровне и принятия упреждающих мер по противодействию им, что позволяет сохранять общий показатель устойчивости сети на требуемом интервале времени.

Разработанная методика, рисунок 2, включает в себя следующие этапы:

1. В процессе функционирования фрагмента ОТСС СН его информационная безопасность определяется как нормальное или нарушение конфиденциальности, целостности и доступности $S = \{S_H, S_K, S_C, S_D\}$.

В соответствии с требованием руководящих документов ФСТЭК России [5], разрабатывается модель угроз ИБ, включающая перечень актуальных угроз для конкретного фрагмента ОТСС СН. Определяются соответствующие им типы сетевых атак $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$.

2. Определение перечня параметров качества функционирования элемента ОТСС СН подлежащих мониторингу (M_k) представляющие собой многомерные массивы данных, в которых закодирова-

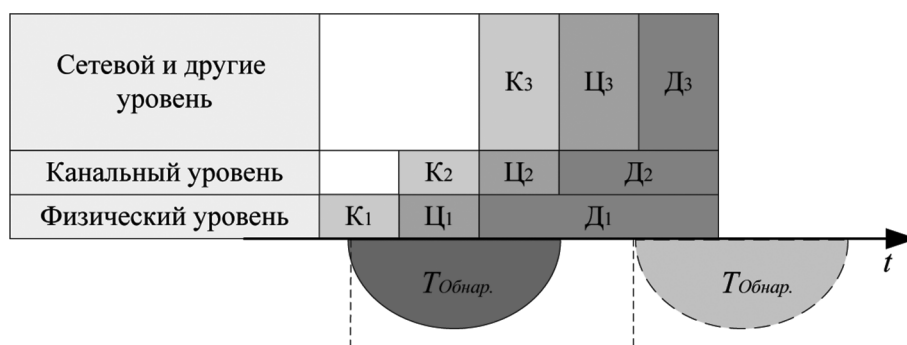


Рис. 1. Взаимосвязь уровней ЭМВОС и состояний ИБ

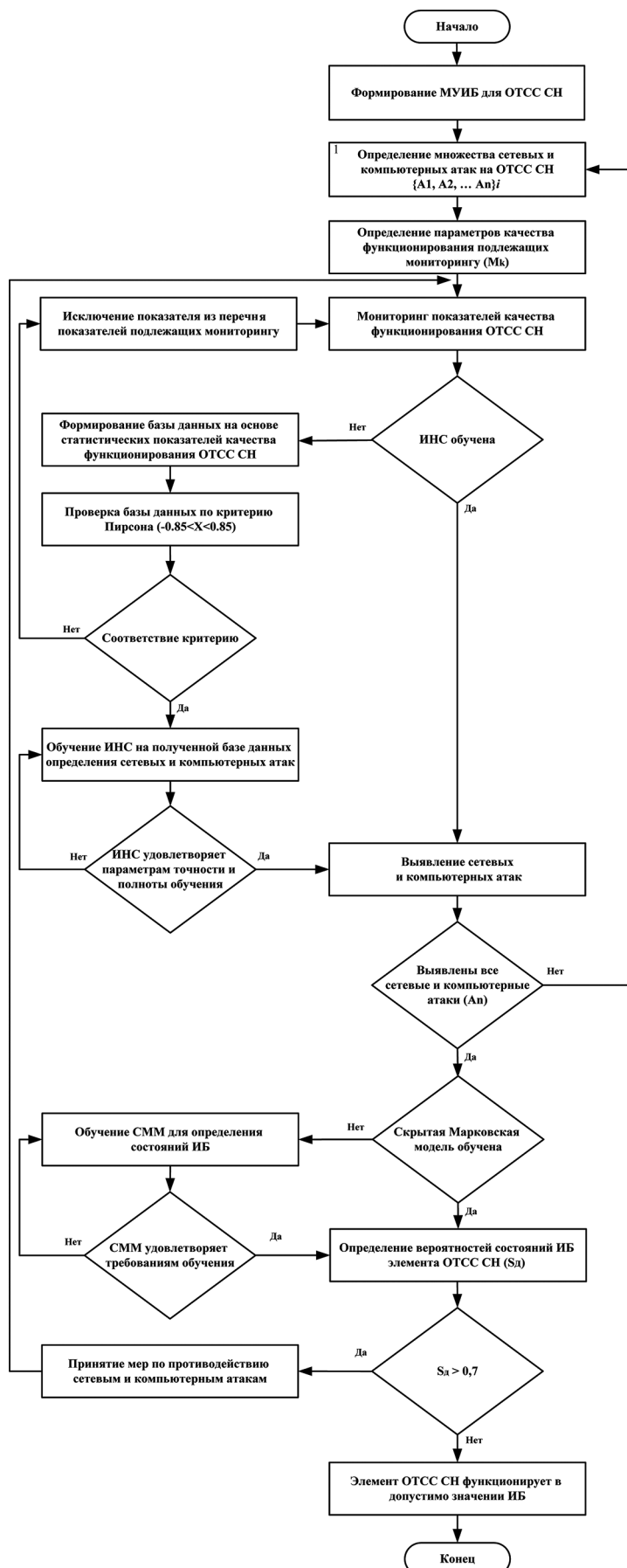


Рис. 2. Алгоритм обнаружения и прогнозирования состояний ИБ

ны значения показателей, влияющих на функционирование элемента OTCC CH.

В таблице 1 представлен вариант контролируемых параметров способных отображать качество функционирования волоконно-оптических систем передач.

Таблица 1.

Контролируемые параметры оптических линий связи

Параметр	Описание	Параметр	Описание
CD	Хроматическая дисперсия	UBE-FEC	Неисправных ошибок после FEC
DGC	Дифференциальная групповая задержка	BER-POST_FEC	Частота ошибок после FEC
OSNR	Отношение оптический сигнал/шум	OPR	Принятая оптическая мощность
PDL	Потери, зависящие от поляризации	OPT	Переданная оптическая мощность
Q-factor	Q-Фактор	OFT	Оптическая частота на передаче
BE-FEC	Ошибки до FEC	OFR	Оптическая частота на приеме
BER-FEC	Частота ошибок до FEC	LOS	Потери сигнала

3. Формирование базы данных на основе статистических показателей качества функционирования OTCC CH.

При подготовке обучающей базы данных важно убедиться, что данные не содержат сильной мультиколлинеарности [6] (взаимозависимости между входными переменными), с помощью коэффициента корреляции Пирсона (3) необходимо:

- определить, какие параметры имеют высокую степень корреляции и могут дублировать информацию.

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n\sigma_x\sigma_y} = \begin{cases} \leq 1 \\ 0 \\ \geq -1 \end{cases} \quad (3)$$

- сократить размерность данных путем исключения высокоррелированных параметров.

Если значения коэффициента корреляции Пирсона для определенных параметров выходят за пороговые значения $-0.85 \leq K \leq 0.85$, один из этих параметров показателя качества функционирования исключается из об-

учающей базы данных, так как он избыточен и не влияет на обучение ИНС [7].

Данные контролируемых параметров преобразуются в тензоры ключевых параметров, представляющие собой многомерные массивы данных, в которых закодированы значения показателей, влияющих на функционирование элемента OTCC CH.

Тензоры позволяют учесть взаимодействие между различными характеристиками и более точно описать состояние системы при сетевых атаках.

4. Для обнаружения сетевых атак, на контролируемых параметрах, используется искусственной нейронной сети (ИНС). В качестве структуры ИНС выбран многослойных персептронов.

Архитектура ИНС обозначается как «5:3:2», что отражает количество нейронов в каждом слое. Для обучения сети применяется алгоритм обратного распространения ошибки, обеспечивающий корректировку весов на основе минимизации функции потерь (4,5).

$$y_j^1 = T_f \left(\sum_i d_i w_{ij}^1 \right) \quad (4)$$

$$y_j^2 = T_f \left(\sum_j y_j^1 w_{kj}^2 \right) \quad (5)$$

Все слои содержат нейроны, где осуществляется нелинейное преобразование с использованием функции активации. Связи между слоями задаются весами w_{ij}^1 и w_{ki}^2 , которые настраиваются в процессе обучения модели. Выходной слой состоит из двух нейронов, обеспечивающих получение итогового результата.

5. После обучения ИНС, необходима проверка полноты (6) и точности (7) обучения ИНС. Данная проверка выполняется с использованием кривой зависимости истинно положительных значений (ИПЗ) от ложноположительных значений (ЛПЗ), вычисляемых по формулам:

$$\begin{cases} \text{ИПЗ} = \frac{\text{ИП}}{\text{ИП} + \text{ЛО}}, \\ \text{ЛПЗ} = \frac{\text{ЛП}}{\text{ЛП} + \text{ИО}} \end{cases} \quad (6)$$

где ИП — число истинно положительных предсказаний, ЛО — число ложно отрицательных значений, ЛП — число ложно положительных предсказаний, ИО — число истинно отрицательных значений.

На основе этих показателей строится ROC-кривая, позволяющая визуальное оценить полноту обученной ИНС на основе обучающих данных.

Точность, как показатель обучения ИНС рассчитывается, как площадь под кривой (AUC) с помощью интегрирования.

$$AUC = \int_0^1 \text{ИПЗ(ЛПЗ)} d(\text{ЛПЗ}) \quad (7)$$

В случае низкого значения точности обучения данные показатели можно улучшить за счет увеличения размерности обучающих данных или же изменение структуры ИНС и ее повторного обучения, пока не будет достигнут желаемый результат.

Обученная и удовлетворяющая требованиям ИНС определяет соответствующие типы сетевых атак $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ в каждый момент времени t и формирует кортеж функционирования элемента ОТСС СН.

6. Обучение СММ для определения состояний ИБ.

Под скрытой марковской моделью понимают статистическую [8] модель, имитирующую работу процесса с неизвестными параметрами, который считается марковским $\lambda = (S, A, \pi)$, где S — матрица переходов скрытых состояний (s_{ij}), A — матрица зависимости наблюдаемых событий от скрытых (a_{ji}), π — начальные вероятности нахождения в скрытых состояниях (S_n).

В данном случае, в качестве наблюдаемых событий выступает кортеж по типам сетевых атак, а состояниями СММ выступает ИБ элемента ОТСС СН за определенный интервал времени, рисунок 3.

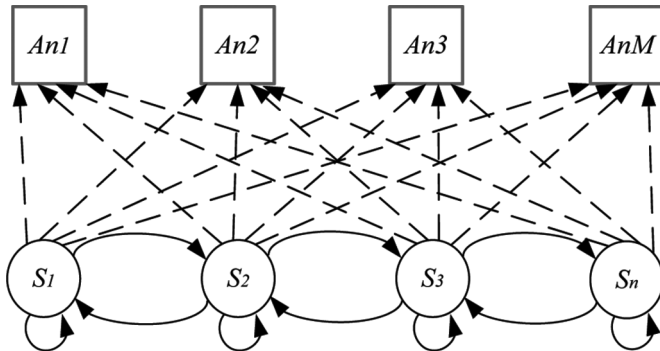


Рис. 3. Структура скрытой Марковской модели

Далее расчета значения переходных вероятностей матрицы S , выполняются итерации алгоритма Баума-Велша [9], прямого распространения ($\alpha_t(i)$).

$$\alpha_1(i) = \pi_i a_{i1}, \quad (8)$$

$$\alpha_t(i) = \left(\sum_{j=1}^4 \alpha_{t-1}(j) \times s_{ji} \right) \times a_{i,t}, \quad (9)$$

где S_{ji} — веса случайно-инициализированной квадратной матрицы скрытых состояний S , проводя расчеты для всех значений $t = 1, 2, 3, \dots, F$.

По завершению прямого распределения выполняется обратное распространение ($\beta_t(i)$), для чего инициализируют время $t = (F, F-1, \dots, 1)$, рекурсивно рассчитывается

$$\beta_t(i) = \sum_{j=1}^4 s_{ij} \times a_{j,t+1} \times \beta_{t+1}(j). \quad (10)$$

7. Принятие превентивных мер по поддержанию устойчивости.

На основе вычисленных вероятностей состояний информационной безопасности элементов ОТСС СН принимаются решения о необходимых превентивных мерах для снижения рисков нарушения устойчивости сети. Если вероятность критического состояния (например, нарушение доступности) превышает пороговое значение (0,7), выполняются следующие действия:

- направление линейно-восстановительных групп;
- переход на резервные линии связи;
- переход на резервные оптические волокна;
- переход на другие технологии передачи информации на канальном уровне.

Применение этих мер позволяет оперативно реагировать на угрозы информационной безопасности и поддерживать устойчивость оптических транспортных сетей связи специального назначения.

Вывод

В данной статье предложена методика повышения устойчивости ОТСС СН на основе сокращения времени обнаружения и идентификации атак. Основные достижения:

Разработан алгоритм прогнозирования состояний ИБ с применением ИНС и СММ.

Представлены контролируемые параметры качества работы оптических линий связи.

Определены превентивные меры, позволяющие снизить влияние атак на сеть.

Применение данного подхода позволяет сократить время восстановления сети, повысить ее живучесть и надежность, что критически важно для специального назначения ОТСС СН в условиях современных угроз информационно й безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 53110–2008. Система обеспечения информационной безопасности сети связи общего пользования. Введен с 18.12.2008, переиздан в мае 2020. М.: Стандартиформ, 2020. 23 с.
2. ГОСТ Р 53111–2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Введен с 18.12.2008, переиздан в мае 2010. М.: Стандартиформ, 2020. 19 с.
3. Алпеев Е.В., Стадник А.Н., Скрыль С.В. Методика прогнозирования компьютерных атак на основе определения весов атрибутов компьютерной атаки с применением метода деревьев решений // Научные труды КубГТУ. 2021. № 6. С. 82–92.
4. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность объекта. Введен с 01.01.2022. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 35 с.
5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99. ВОС. Базовая эталонная модель. Часть 1. Базовая модель. — ОКС: 35.100.70. — Действует с 01.01.2000. — 62с.
6. Банк данных угроз безопасности информации. [Электронный ресурс] // ФСТЭК России URL: <https://bdu.fstec.ru/threat> (дата обращения 25.01.2025)
7. Созыкин А.В. Обзор методов обучения глубоких нейронных сетей // Вестник ЮУрГУ. Вычислительная математика и информатика. — 2017 Т. 6, № 3 — С.28–59.
8. Якунькин, В.Р. Машинное обучение с учителем / В.Р. Якунькин, Е.А. Панин // Оригинальные исследования. — 2022. — Т. 12, № 3. — С. 5–9.
9. Третьяков И.А. Обоснование применения скрытых марковских моделей с функцией плотности распределения наблюдений в АСНИ / И.А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. — 2023. — № 2. — С. 16–21., Стр. 16
10. Попов А.А., Гуляева Т.А., Уваров В.Е. Распознавание, декодирование и восстановление последовательностей с пропусками, описываемых скрытой марковской моделью с дискретным распределением наблюдений // Системы анализа и обработки данных. 2017. №1 (66). с. 99–119. стр. 102.

© Грищенко Сергей Сергеевич (sergeogri@yandex.ru); Иванин Андрей Николаевич (andreiivanin@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВКЛАД МАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ГЕНЕРАЦИЮ ПРОДОЛЬНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ДОМЕННОЙ ГРАНИЦЫ В ОРТОФЕРРИТЕ ИТТРИЯ В ПРИСУТСТВИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ

CONTRIBUTION OF A MAGNETIC WAVE TO THE GENERATION OF A LONGITUDINAL ACOUSTIC WAVE DURING THE MOVEMENT OF A DOMAIN WALL IN YTTRIUM ORTHOFERRITE IN THE PRESENCE OF AN EXTERNAL MAGNETIC FIELD AND ABSORPTION

**E. Zhukov
V. Ivanov**

Summary. The article presents solutions to a system of dynamic equations describing the influence of magnetic waves on the generation of longitudinal acoustic waves during domain boundary motion in yttrium orthoferrite, taking into account the external constant magnetic field and absorption. It is established that the increase in the influence of the magnetic subsystem on the generation of a longitudinal acoustic wave depends on the velocity of the domain boundary. The calculations show that the greatest contribution of the magnetic wave to the generation of a longitudinal acoustic wave during domain boundary motion at a velocity of about 10^6 cm/s is about 10^{-12} cm.

Keywords: domain boundary, magnetic waves, longitudinal acoustic waves, transverse acoustic waves, yttrium orthoferrite, slowly changing amplitudes.

Жуков Евгений Александрович

д-р. физико-математических наук, профессор,
Тихоокеанский государственный университет,
г. Хабаровск

e_a_zhukov@mail.ru

Иванов Валерий Иванович

д-р. физико-математических наук,
Дальневосточный государственный университет
путей сообщения, г. Хабаровск
ivanov@festu.khv.ru

Аннотация. В статье получены решения системы динамических уравнений, описывающих влияние магнитных волн на генерацию продольных акустических волн при движении доменной границы в ортоферрите иттрия с учетом внешнего постоянного магнитного поля и поглощения. Установлено, что увеличение влияния магнитной подсистемы на генерацию продольной акустической волны зависит от скорости движения доменной границы. Проведенные расчеты показывают, что наибольший вклад магнитной волны при движении доменной границы со скоростью порядка 10^6 см/с в генерацию продольной акустической волны составляет порядок 10^{-12} см.

Ключевые слова: доменная граница, магнитные волны, продольные акустические волны, поперечные акустические волны, ортоферрит иттрия, медленно меняющиеся амплитуды.

Введение

Актуальной задачей информационных технологий является повышение скорости обработки информации. С этой целью для записи информации применяют магнитные материалы [1], в частности слабые ферромагнетики, в которых используется ориентация магнитных моментов, а время обработки определяется скоростью движения доменных границ (ДГ) [2]. Наиболее перспективным для применения в быстродействующих устройствах обработки информации является ортоферрит иттрия, обладающий большими полями анизотропии и незначительными полями размагничивания, а также уникальными магнитооптическими свойствами [3]. Так в ортоферрите иттрия скорость движения ДГ достигает рекордных значений $2 \cdot 10^6$ см/с [4].

Для повышения скорости работы подобных устройств необходимо установление механизмов взаимодействий в акустической и магнитной подсистемах, вызываемых движением ДГ в ортоферрите иттрия. Начальные исследования движения ДГ в ферромагнетиках приведены в работе [5] и продолжено изучение магнитоакустических эффектов в [6] и [7]. Расчеты взаимодействия ДГ со звуковыми волнами при ее движении в ортоферрите иттрия вдали от звуковых скоростей проводились экспериментально в работах [8] и [9]. А в работе [10] дается оценка смещения амплитуды акустической системы при приближении к звуковым скоростям движения ДГ в ортоферрите иттрия. Теоретический расчет генерации магнитных волн в движущейся ДГ в ортоферрите иттрия со скоростью близкой к звуковой без влияния акустической системы проведен в работе [11], а в [12] учитывалось обратное влияние акустических волн. Взаимодей-

ствии магнитных и продольных акустических волн при движении ДГ в ортоферрите иттрия со скоростью близкой к звуковой в отсутствие поглощения и постоянного магнитного поля изучено в [13]. Расчеты в [14], [15] и [16] показывают, что движение ДГ в слабых ферромагнетиках при определенных скоростях сопровождается ее торможением и генерацией магнитных и акустических волн.

В настоящей работе изучается влияние магнитной волны, генерируемой движущейся ДГ в ортоферрите иттрия с учетом поглощения и внешнего постоянного магнитного поля, на продольную акустическую волну. Теоретически дается оценка смещения амплитуды продольной акустической волны и установлено, что максимальное смещение порядка 10^{-6} см возможно при скоростях движения ДГ близких к звуковым.

Постановка задачи

Полные динамические уравнения, описывающие взаимодействие волн акустических смещений продольной и поперечной (относительно оси x) $V_l = V_l(x, t)$, $V_t = V_t(x, t)$ и переменной $U = U(x, t)$ — угла антиферромагнитного вектора в плоскости xz при движении ДГ в ортоферрите иттрия, имеют вид [17]:

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) U + \frac{b_3}{2A} \sin 2U = -\frac{\delta_l}{A} \frac{\partial V_l}{\partial x} \sin 2U + \frac{\delta_t}{A} \frac{\partial V_t}{\partial x} \cos 2U + \frac{\alpha M}{Ag} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{mH}{A} \sin U; \quad (1)$$

$$\left(\frac{1}{s_l^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) V_l = -\frac{\delta_l}{\rho s_l^2} \frac{\partial U}{\partial x} \sin 2U; \quad (2)$$

$$\left(\frac{1}{s_t^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) V_t = -\frac{\delta_t}{\rho s_t^2} \frac{\partial U}{\partial x} \cos 2U. \quad (3)$$

Здесь A — постоянная обменной энергии; b_3 — константа анизотропии; ρ — плотность; δ_{lt} — магнитоакустические константы; s_{lt} — скорость объемных продольных и поперечных звуковых волн; α — коэффициент поглощения магнитных волн; g — гиромагнитное отношение; M — амплитуда магнитного момента элементарной кристаллической решетки; m — нормированный вектор намагниченности; H — амплитуда внешнего магнитного поля; c — предельная скорость ДГ; t — время. Угол $U(x, t)$ антиферромагнитного вектора относительно нормали плоскости ДГ изменяется от $-\pi/2$ до $+\pi/2$. От координаты U переменные не зависят.

В левой части уравнения (1) второе слагаемое учитывает влияние на магнитную волну поля анизотропии. В правой части уравнения (1) учитывается внешнее магнитное поле и поглощение магнитной волны.

Уравнения (2) и (3) описывают смещения продольной и поперечной акустических волн соответственно, с уче-

том магнитоакустического взаимодействия в правой части уравнений.

Для определения влияния угла вектора $U(x, t)$ на смещение продольной акустической волны $V_l(x, t)$ с учетом поглощения и присутствием постоянного внешнего магнитного поля ($mH \neq 0$ и $\alpha M \neq 0$), рассмотрим систему двух динамических уравнений (1), (2). Так как предполагаем, что акустические волны не оказывают обратного влияния на магнитную волну, то в уравнении (1) исключим малую добавку:

$$-\frac{\delta_l}{A} \frac{\partial V_l}{\partial x} \sin 2U + \frac{\delta_t}{A} \frac{\partial V_t}{\partial x} \cos 2U = 0. \quad (4)$$

При условии (4) уравнение (1) является уравнением одной неизвестной функции $U(x, t)$. Решение этого уравнения определим в виде [18]:

$$U = U_0 + U_1, \quad U_1 \ll U_0, \quad (5)$$

$$U_0(x, t) = -2 \operatorname{arctg} \left(e^{\frac{x-vt}{D_3}} \right), \quad D_3 = \sqrt{\frac{A}{b_3} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)}, \quad (6)$$

$U_0(x, t)$ является решением уравнения

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) U_0(x, t) + \frac{b_3}{2A} \sin 2U_0(x, t) = 0, \quad (7)$$

где v — скорость ДГ ($v \leq 2 \cdot 10^6$ см/с), U_0 описывает намагниченность движущейся ДГ с учетом поля анизотропии, без учета внешнего магнитного поля и поглощения ($mH = 0$ и $\alpha M = 0$), а U_1 — угол вектора магнитной волны, генерируемой движущейся доменной границей, причем $U_1 \ll U_0$, так как правая часть уравнения (1) при условии (4) очень мала [19].

Параметры ДГ определяются из (6):

$$\sin 2U_0 = 2 \frac{\operatorname{sh} \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)}{\operatorname{ch}^2 \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)}; \quad \frac{\partial U_0}{\partial x} = \frac{-1}{D_3 \operatorname{ch} \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)}; \quad \sin U_0 = \frac{1}{\operatorname{ch} \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)}; \quad \frac{\partial U_0}{\partial t} = \frac{v}{D_3 \operatorname{ch} \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)}. \quad (8)$$

При условии (5) ($U_1 \ll U_0$) и с учетом (7), система уравнений (1), (2) сводится к линейным уравнениям, как показано в [13]:

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) U_1 = \frac{mH}{A} \sin U_0 + \frac{\alpha M}{gA} \frac{\partial (U_0 + U_1)}{\partial t}, \quad (9)$$

$$\left(\frac{1}{s_l^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) V_l = -\frac{\delta_l}{\rho s_l^2} \frac{\partial (U_0 + U_1)}{\partial x} \sin 2U_0. \quad (10)$$

Таким образом, влияние магнитной волны при условии $mH \neq 0$, $\alpha M \neq 0$ на генерацию продольной акустической волны без обратного влияния акустических волн (4), определяется системой линейных дифференциальных уравнений (9), (10).

Определение угла вектора магнитной волны в отсутствии обратного влияния акустических волн при движении ДГ в ортоферрите иттрия

Решение линейного уравнения (9) ищем методом теории возмущений [18]:

$$U_1 = U_1^{(1)} + U_1^{(2)}, \quad (11)$$

где $U_1^{(1)} = U_1^{(1)}(x, t)$ — нулевое приближение. Это угол вектора магнитной волны без возмущения внешним магнитным полем ($mH = 0$) и в отсутствии поглощения ($\alpha M = 0$), удовлетворяет уравнению:

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) U_1^{(1)}(x, t) = 0. \quad (12)$$

Считаем, что во взаимодействии участвует спектральная составляющая ДГ, пропорциональная $\sim e^{i\omega t - ikx}$, поэтому решение определяем в виде медленно меняющихся амплитуд [18]:

$$U_1^{(1)}(x, t) = F(x - vt) e^{i\omega_s t - ik_s x} + F^*(x - vt) e^{-i\omega_s t + ik_s x}. \quad (13)$$

При чем, неизвестные амплитуды $F(x - vt)$ и $F^*(x - vt)$ комплексно-сопряженные функции, удовлетворяют условию:

$$\left| \frac{\partial^2 F(x - vt)}{\partial t^2} \right| \ll \left| \omega_s \frac{\partial F(x - vt)}{\partial t} \right|; \quad \left| \frac{\partial^2 F(x - vt)}{\partial x^2} \right| \ll \left| k_s \frac{\partial F(x - vt)}{\partial x} \right|. \quad (14)$$

Для определения амплитуд подставим решение (13) в уравнение (12). В полученном уравнении приравняем выражения при $e^{i\omega_s t - ik_s x}$ и $e^{-i\omega_s t + ik_s x}$ к нулю. Получим два уравнения. Так как $F(x - vt)$ и $F^*(x - vt)$ комплексно-сопряженные функции, то выберем одно уравнение, например, для $F(x - vt)$. С учетом (14), исключим в выбранном уравнении вторые производные и обозначив $\xi = x - vt$, получим уравнение:

$$\frac{dF(\xi)}{d\xi} i \left(2k_s - \frac{2\omega_s v}{c^2} \right) = F(\xi) \left(k_s^2 - \frac{\omega_s^2}{c^2} \right).$$

Из полученного уравнения следует

$$F(\xi) = e^{ir\xi}, \quad r = \frac{\omega_s^2 - k_s^2 c^2}{2k_s c^2 - 2\omega_s v}, \quad \xi = x - vt. \quad (15)$$

Таким образом, решение (13) определено. В (13)–(15) ω , ω_s , ω_a , k , k_s , k_a — частоты и волновые числа напряжений ДГ, магнитных и акустических волн. Для них приняты законы дисперсии для акустических, магнитных волн и спектральных компонент магнитоакустических напряжений ДГ в виде [20]:

$$\omega = \omega_s + \omega_a; \quad \omega_a = s_l k_a; \quad \omega = kv; \quad k = k_s + k_a. \quad (16)$$

Тогда, из (9), (11), (12) следует, что угол вектора магнитной волны $U_1^{(2)} = U_1^{(2)}(x, t)$ — в присутствии внешнего постоянного магнитного поля и поглощения ($mH \neq 0$ и $\alpha M \neq 0$), является решением уравнения:

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\alpha M}{gA} \frac{\partial}{\partial t} \right) U_1^{(2)}(x, t) = \frac{mH}{A} \sin U_0 + \frac{\alpha M}{gA} \frac{\partial U_0}{\partial t}. \quad (17)$$

Из (8), (9) очевидно, что $U_1^{(2)}(x, t) = U_1^{(2)}(x - vt)$. Воспользуемся обозначением $\xi = x - \sigma t$, тогда уравнение (17) примет вид:

$$\frac{d^2 U_1^{(2)}(\xi)}{d\xi^2} \left(\frac{v^2}{c^2} - 1 \right) + \frac{\alpha M v}{gA} \frac{dU_1^{(2)}(\xi)}{d\xi} = \left(\frac{mH D_3}{A} + \frac{\alpha M v}{gA} \right) \frac{1}{D_3 \operatorname{ch} \left(\frac{\xi}{D_3} \right)}. \quad (18)$$

Линейное дифференциальное уравнение второго порядка (18) решим методом вариации произвольных постоянных (метод Лагранжа) [21], получим:

$$U_1^{(2)} = \frac{Q_2}{Q_1} D_3 2 \operatorname{arctg} e^{\frac{\xi}{D_3}} - \frac{Q_2}{Q_1^2} D_3 \operatorname{th} \left(\frac{\xi}{D_3} \right), \quad Q_1 = \frac{\alpha M v c^2}{gA(v^2 - c^2)}, \quad Q_2 = \frac{(gD_3 mH + \alpha M v) c^2}{gA D_3 (v^2 - c^2)}. \quad (19)$$

В приближенном решении $U_1^{(2)}$ (19) исключены слагаемые, порядок которых меньше 10^{-13} см (расчеты выполнены с учетом значений параметров уравнений (1) и (2), приведенных в таблице 1, с использованием таблицы интегралов [22]). Таблица значений параметров уравнений (1), (2) составлена по данным [23]:

Расчет вклада магнитной подсистемы в отсутствие обратного влияния акустических волн в генерацию продольной акустической волны при движении ДГ в ортоферрите иттрия

Влияние магнитной волны при условии $mH \neq 0$, $\alpha M \neq 0$ и (4) на генерацию продольной акустической волны, определяется решением уравнения (10). Так как уравнение (10) линейное, то с учетом (5), (8), (11)

Таблица 1.
Значения параметров уравнений (1), (2)

$c=2 \cdot 10^6 \text{ см/с};$	$s_l=0,7 \cdot 10^6 \text{ см/с};$	$k_s = k_a = 10^6 \text{ с}^{-1};$
$v = 1,53 \cdot 10^6 \text{ см/с};$	$\omega_s = 2,36 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1};$	$\delta_l = 5 \cdot 10^6 \text{ эрг/см}^3;$
$\omega = 3,06 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1};$	$k = 2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1};$	$b_3 = 1,08 \cdot 10^6 \text{ Э/см}^3;$
$\omega_a = 7 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1};$	$D_3 = 10^{-6} \text{ см};$	$A = 8,8 \cdot 10^{-7} \text{ Э/см}^3;$
$\rho = 5,6 \text{ г/см}^3;$	$\alpha = 10^5 \text{ см}^{-1};$	$m=10^{-2} \text{ г}; H=60\text{Э}.$

его решение ищем методом теории возмущений [18] в виде:

$$V_l = V_l^{(0)} + V_l^{(1)} + V_l^{(2)}. \quad (20)$$

В (20) $V_l^{(0)}, V_l^{(1)}, V_l^{(2)}$ – решения уравнений:

$$\left(\frac{1}{s_l^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) V_l^{(0)} = -2 \frac{\delta_l}{\rho s_l^2} \frac{\partial U_0}{\partial x} \frac{\text{sh} \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)}{\text{ch}^2 \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)}; \quad (21)$$

$$\left(\frac{1}{s_l^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) V_l^{(1)} = -2 \frac{\delta_l}{\rho s_l^2} \frac{\partial U_1^{(1)}}{\partial x} \frac{\text{sh} \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)}{\text{ch}^2 \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)}; \quad (22)$$

$$\left(\frac{1}{s_l^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) V_l^{(2)} = -2 \frac{\delta_l}{\rho s_l^2} \frac{\partial U_1^{(2)}}{\partial x} \frac{\text{sh} \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)}{\text{ch}^2 \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)}. \quad (23)$$

Уравнения (21)–(23) определяют составляющие решения продольной акустической волны (20): из (21) следует, что составляющая $V_l^{(0)}$ генерируется магнитной волной с учетом поля анизотропии, без учета внешнего магнитного поля и поглощения; составляющая $V_l^{(1)}$ (22) генерируется магнитной волной без постоянного магнитного поля и в отсутствии поглощения; составляющая $V_l^{(2)}$ (23) генерируется магнитной волной, в присутствии постоянного внешнего магнитного поля и поглощения.

Из уравнения (21) с учетом (8) определим первое слагаемое решения (20) $V_l^{(0)}$:

$$\left(\frac{1}{s_l^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) V_l^{(0)} = \frac{\delta_l}{\rho s_l^2} \left(\frac{2}{D_3} \right) \frac{\text{sh} \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)}{\text{ch}^3 \left(\frac{x-vt}{D_3} \right)}. \quad (24)$$

Очевидно, что решение уравнения (24) есть функция от $(x-vt)$. Введем обозначение $\xi = x-vt$, тогда (24) примет вид:

$$\frac{d^2 V_l^{(0)}(\xi)}{d\xi^2} = \frac{\text{sh} \left(\frac{\xi}{D_3} \right)}{\text{ch}^3 \left(\frac{\xi}{D_3} \right)} \frac{2\delta_l}{\rho(v^2 - s_l^2) D_3}. \quad (25)$$

Из (25), получим

$$V_l^{(0)}(\xi) = -\frac{D_3 \delta_l}{\rho(v^2 - s_l^2)} \text{th} \left(\frac{\xi}{D_3} \right), \quad \xi = x-vt. \quad (26)$$

С учетом (13) и (15), из уравнения (22) найдем $V_l^{(1)}$. Решение определяем в виде медленно меняющихся амплитуд [18], так как в силу (13) считаем, что во взаимодействии участвует спектральная составляющая ДГ, пропорциональная $\sim e^{i\omega t - ikx}$:

$$V_l^{(1)}(x, t) = R(x-vt) e^{i\omega_a t - ik_a x} + R^*(x-vt) e^{-i\omega_a t + ik_a x}. \quad (27)$$

Используя формулы (16), преобразуем (27) к удобному для дальнейших вычислений виду:

$$V_l^{(1)}(x, t) = R(x-vt) e^{-ik(x-vt)} e^{-i\omega_s t + ik_s x} + R^*(x-vt) e^{ik(x-vt)} e^{i\omega_s t - ik_s x}. \quad (28)$$

Определим неизвестные амплитуды $R(x-vt)$ и $R^*(x-vt)$. Для этого найдем производные функции (28) и подставим в уравнение (22) с учетом (13), (15). В полученном уравнении приравняем выражения при равных экспонентах. Получим систему двух уравнений. Так как $R(x-vt)$ и $R^*(x-vt)$ – комплексно-сопряженные функции, то достаточно найти одну из них. Выберем, например, уравнение для функции $R(x-vt)$. В этом уравнении, воспользуемся свойством метода медленно меняющихся амплитуд (14), исключим вторые производные и воспользуемся законом дисперсии (16): $\omega_a^2 - k_a^2 s_l^2 = 0$. Введем обозначение $\xi = x-vt$, получим уравнение для неизвестной амплитуды:

$$2i\omega_a \left(\frac{v-s_l}{s_l^2} \right) \frac{dR(\xi)}{d\xi} = \frac{2\delta_l}{\rho s_l^2} \frac{\text{sh} \left(\frac{\xi}{D_3} \right)}{\text{ch}^2 \left(\frac{\xi}{D_3} \right)} (ik_s - ir) e^{-ir\xi} e^{ik_s \xi}. \quad (29)$$

Используя данные значений параметров уравнений (1), (2) (Таблица 1) и с учетом (15), получим: $r = k = 2 \cdot 10^6$. Тогда, решение уравнения (29) имеет вид:

$$R(\xi) = \frac{\delta_l D_3 (r - k_s)}{\rho \omega_a (v - s_l)} \frac{1}{\text{ch} \left(\frac{\xi}{D_3} \right)}, \quad \xi = x-vt. \quad (30)$$

Амплитуда (30) полностью определяет решение (27) уравнения (22).

Третье слагаемое $V_I^{(2)}$ решения (20) определяем из уравнения (23). Введем обозначение, $\xi = x - vt$ тогда, с учетом (19), уравнение (23) примет вид:

$$\frac{d^2 V_I^{(2)}(\xi)}{d\xi^2} = \frac{-2\delta_I}{\rho(v^2 - s_I^2)} \left(\frac{Q_2}{Q_1} \frac{\text{sh}\left(\frac{\xi}{D_3}\right)}{\text{ch}^3\left(\frac{\xi}{D_3}\right)} - \frac{Q_2}{Q_1^2} \frac{\text{sh}\left(\frac{\xi}{D_3}\right)}{\text{ch}^4\left(\frac{\xi}{D_3}\right)} \right). \quad (31)$$

Из уравнения (31) следует

$$V_I^{(2)}(\xi) = \frac{\delta_I Q_2 D_3^2}{\rho(v^2 - s_I^2) Q_1} \times \left(\text{th}\left(\frac{\xi}{D_3}\right) - \frac{1}{3Q_1} \left(\frac{\text{sh}\left(\frac{\xi}{D_3}\right)}{\text{ch}^2\left(\frac{\xi}{D_3}\right)} - 2\text{arctge}^{\frac{\xi}{D_3}} \right) \right), \quad (32)$$

$$\xi = x - vt.$$

Получим оценку вклада магнитной волны без обратного влияния на нее акустических волн, в генерацию продольной акустической волны

По данным параметров уравнений (1), (2) (Таблица 1) выполним расчет составляющих (26), (30), (32) решения (20), где $\xi = x - vt$:

$$V_I^{(0)}(\xi) = -4,8 \cdot 10^{-13} \text{th}(10^6 \xi), \quad (33)$$

$$R(\xi) = 1,54 \cdot 10^{-12} \frac{1}{\text{ch}(10^6 \xi)}, \quad (34)$$

$$V_I^{(2)}(\xi) = 4,8 \cdot 10^{-13} \times$$

$$\times \left(\text{th}(10^6 \xi) - 9 \cdot 10^{-14} \left(\frac{\text{sh}(10^6 \xi)}{\text{ch}^2(10^6 \xi)} - 2\text{arctge}^{10^6 \xi} \right) \right). \quad (35)$$

Все функции в расчетах (33)–(35) абсолютно ограниченные числом 1, что позволяет дать максимальную оценку влияния магнитных волн, возбуждаемых в движущейся с заданной скоростью в ортоферрите иттрия ДГ, на генерацию продольных акустических волн. Вклад магнитной волны (13), (15) без учета внешнего постоянного магнитного поля при движении ДГ в ортоферрите иттрия, в генерацию продольной акустической волны $V_I^{(1)}(x, t)$ (27) оценивается амплитудой $R(x - vt)$ (34).

Заключение

В работе получено явное решение смещения продольной акустической волны, генерируемой магнитной волной в отсутствии обратного влияния акустических волн на магнитную волну, но с учетом поглощения и присутствием внешнего постоянного магнитного поля ($mH \neq 0$ и $\alpha M \neq 0$), при движении ДГ в ортоферрите иттрия: (20), (26), (27), (30), (32). Расчеты (33)–(35) показывают, что максимальное влияние магнитной волны в присутствии постоянного внешнего магнитного поля и поглощения, на генерацию продольной акустической волны при заданной скорости движения ДГ (Таблица 1) в ортоферрите иттрия, может достигать порядка 10^{-12} см. Из (20), (26), (27), (30), (32) следует, что в движущейся в ортоферрите иттрия ДГ, при скоростях близких к скорости объемных продольных звуковых волн, а именно $1 \leq |v - s_I| \leq 1,28$ (в см/с), вклад магнитной волны в генерацию продольной акустической волны может достигать порядка 10^{-6} см. Такое влияние становится сопоставимым с видимой толщиной доменной стенки в пластинчатом образце с естественными неоднородностями (теоретическая толщина порядка 10^{-6} см). Это явление можно использовать для измерений параметров гиперзвуковых волн (до 10^{12} Гц) оптическими методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. You C.Y. Concept of the field-driven domain wall motion memory // Journal of magnetism and magnetic materials. — 2009. — vol. 321. — №. 7. — p. 888–890.
2. Кузьменко А.П., Жуков Е.А., Ли Ц. Резонансное возбуждение магнитоупругих колебаний в ортоферритах одиночной доменной границей. Вестник Тихоокеанского государственного университета, 2005, №1, с. 9–24.
3. Kuz'menko A.P., Zhukov E.A., Zhukova V.I., Li Tsz., Kaminskii A.V. Study of the structural and dimensional features of the magnetization reversal in transparent weak ferromagnets // The Physics of Metals and Metallography. 2008. T. 106. № 2. С. 164–172.
4. Allwood D.A. et al. Magnetic domain-wall logic // Science. — 2005. — Vol. 309. — №. 5741. — pp. 1688–1692.
5. Ким П.Д., Хван Д.Ч. Вынужденные колебания доменной стенки на высоких частотах // Физика твердого тела. — 1982. — Т. 24. — Вып. 8. — С. 2300–2304.
6. Туров Е.А., Шавров В.Г. Нарушенная симметрия и магнитоакустические эффекты в ферро- и антиферромагнетиках // УФН. — 1983. — Т. 140. Вып. 3. — С. 429–462.
7. Туров Е.А., Колчанов А.В., Меньшенин В.В., Мирсаев И.Ф., Николаев В.В. Симметрия и физические свойства антиферромагнетиков. // М.: Физматлит, 2001. 560 с.
8. Звездин А.К., Мухин А.А. Магнитоупругие уединенные волны и сверхзвуковая динамика доменных границ // ЖЭТФ. — 1992. — Т. 102. — Вып. 2. — С. 577–599.

9. Звездин А.К., Попков А.Ф. Распространение спиновых волн в движущейся доменной границе // Письма в ЖЭТФ. — 1984. — Т. 39. — Вып. 8. — С. 348–351.
10. Барьяхтар И.В., Иванов Б.А. Динамическое торможение доменной границы в слабом ферромагнетике. — Киев: ИТФ АН УССР, 1983. — Препринт ИТФ-83-111Р. — 28 с.
11. Жуков Е.А., Жукова В.И. Вклад акустической подсистемы в генерацию магнитных волн при движении доменной границы в ортоферрите иттрия // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2023. № 3 (70). С. 31–40.
12. Жукова В.И., Жуков Е.А., Панасюк С.Р. Взаимодействие магнитных волн с доменной границей в ортоферрите иттрия // В сборнике: Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование. Материалы XX региональной научной конференции. Под редакцией А.И. Мазура. Хабаровск, 2022. С. 24–27.
13. Жуков Е.А., Жукова В.И. Расчеты взаимодействия магнитных и продольных акустических волн с участием доменной границы в ортоферритах // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2021. № 4 (63). С. 55–64.
14. Е.А. Жуков, А.П. Кузьменко, Ю.И. Щербаков. Торможение движущейся доменной границы в слабых ферромагнетиках // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. В. 6. С. 1033–1036.
15. Жуков Е.А., Адамова М.Е., Жукова В.И., Кузьменко А.П. Механизмы генерации волн Лэмба доменной границей в пластине слабого ферромагнетика // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 11. № 4. С. 123–136.
16. Kuz'menko A.P., Zhukov E.A., Dobromyslov M.B., Kaminsky A.V. Magneto-elastic resonant phenomena at the motion of the domain wall in weak ferromagnets // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2007. Т. 310. № 2 SUPPL. PART 2. С. 1610–1612.
17. Жуков Е.А. Возбуждение магнитоупругих волн одиночной доменной границей в пластинах ортоферритов // Вестник ТОГУ. 2007. №4 (7), с. 61–72.
18. Жуков Е.А., Жукова В.И., Кузьменко А.П. Вклад магнитной подсистемы в генерацию продольных акустических волн при движении доменной границы в ортоферрите иттрия // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13. № 4. С. 54–65.
19. Dynamics of topological magnetic solitons. Experiment and theory / V.G. Bar'yakhtar, M.V. Chetkin, B.A. Ivanov, S.N. Gadetskii // Springer Tracts in Modern Physics. Berlin, 1994. Vol. 129.
20. Komina O.Yu., Adamova M.E., Zhukov E.A., Kuzmenko A.P., Zhukova V.I. Generation of nanometer wavelength acoustic waves // Journal of Nano- and Electronic Physics. — 2016. —V. 8. — No 4. — P. 04020(3pp).
21. Филиппов А.Ф. Введение в теорию дифференциальных уравнений. — Изд. 2-е. — 2007. — 240 с.
22. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. // М.: Наука, 1978. 224 с.
23. Жуков Е.А., Жукова В.И., Каминский А.В., Корчевский В.В., Римлянд В.И. Метод генерации, усиления, и измерения параметров гиперзвуковых волн в магнитных кристаллах // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2012. № 3 (26). С. 17–27.

© Жуков Евгений Александрович (e_a_zhukov@mail.ru); Иванов Валерий Иванович (ivanov@festu.khv.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ВЕСА МОДЕЛИ И ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ

USING REGRESSION ANALYSIS TO ASSESS THE IMPACT OF MODEL WEIGHT AND FORECASTING ACCURACY ON WEB APPLICATION PERFORMANCE

A. Ilyin
S. Plotnikov

Summary. The article examines the relationship between the model weight and the quality of prediction using the regression analysis method. The study is aimed at identifying patterns and obtaining optimal parameters for further development of the author's method of predictive analysis of user behavior. The results proved a clear relationship between these parameters, thereby proving the hypothesis about the influence of the prediction model weight and the attenuation depth on the performance of a web application.

Keywords: predictive analysis, web application, Markov chains, regression analysis, probability theory.

Ильин Андрей Юрьевич

МИРЭА — Российский технологический университет, Москва
frayz2507@gmail.com

Плотников Сергей Борисович

к.т.н. доцент, МИРЭА — Российский технологический университет, Москва
plotnikovsb@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается взаимосвязь веса модели и качество предсказания методом регрессионного анализа. Исследование направлено на выявление закономерностей и получения оптимальных параметров для дальнейшей разработки авторского метода предиктивного анализа пользовательского поведения. Результаты доказали явную связь этих параметров, чем доказали гипотезу о влиянии веса модели предсказания и глубины затухания на производительность работы веб-приложения.

Ключевые слова: предиктивный анализ, веб-приложение, Марковские цепи, регрессионный анализ, теория вероятностей.

Введение

Современные веб-приложения играют ключевую роль в цифровой экономике, предоставляя широкий спектр услуг — от интернет-магазинов до социальных сетей. Быстродействие веб-страниц является критически важным параметром, от которого зависит удовлетворённость пользователей [1]. Кроме того, исследование компании Akamai показало, что задержка загрузки страницы в 100 миллисекунд снижает уровень десктопной конверсии на 2,4 %, а мобильной — на 7,1 %. Секундная задержка снижает конверсию с десктопов на 21,8 %, со смартфонов — на 20,5 %, а с планшетов — на 17,8 % [2]. Эти данные подчёркивают, что для создания конкурентоспособного продукта необходимо постоянно оптимизировать скорость взаимодействия веб-приложения с пользователем.

С цифровой трансформацией требования к качеству и быстродействию веб-приложений постоянно возрастают. Компании вынуждены модернизировать свою инфраструктуру, чтобы соответствовать ожиданиям пользователей, которые теперь требуют не только функциональности, но и высокой производительности. Цифровая трансформация требует внедрения иннова-

ционных методов разработки и использования новых алгоритмов, способных анализировать поведение пользователей и предугадывать их потребности [3]. Это обусловлено тем, что современный рынок требует быстрой адаптации и постоянного совершенствования сервисов.

В условиях такой динамики появляется необходимость использования алгоритмов предиктивного анализа, позволяющих не только анализировать текущие данные, но и прогнозировать будущие действия пользователей. Среди методов предиктивного анализа можно выделить несколько подходов, каждый из которых имеет свои преимущества. Одним из эффективных методов являются марковские цепи, которые позволяют моделировать вероятностное поведение пользователей, переходящих из одного состояния в другое. Марковские цепи широко применяются для оценки и предсказания последовательностей действий в веб-приложениях, что помогает заранее оптимизировать загрузку контента (например, переходы между страницами) [4].

Другим эффективным методом является регрессионный анализ, который применяется для оценки зависимости различных параметров системы. С его помощью можно установить, как изменение вычислительной на-

грузки или других характеристик модели влияет на время отклика приложения. Регрессионный анализ позволяет не только выявить ключевые зависимости, но и количественно оценить вклад каждого параметра в общую производительность системы [5].

Наконец, современные нейронные сети представляют собой ещё один перспективный подход в области предиктивного анализа. Благодаря своей способности обучаться на больших объёмах данных, нейронные сети могут эффективно предсказывать поведение пользователей, даже при наличии сложных нелинейных зависимостей. Этот метод особенно актуален в условиях постоянного роста данных и необходимости адаптации к быстро меняющимся условиям эксплуатации веб-приложений [6].

В условиях быстрого роста объёма данных и повышения требований к быстродействию веб-приложений, становится очевидным, что для эффективного предсказания поведения пользователей необходимы алгоритмы, которые бы минимизировали вычислительную нагрузку, сохраняя высокий уровень точности.

Применение методов марковских цепей позволит эффективно сохранять баланс между поставленными целями. Однако сокращение объёма обрабатываемых данных требует глубокого анализа влияния упрощений на точность прогнозов, как свидетельствуют исследования в области оптимизации алгоритмов [7, 8] и современные подходы в машинном обучении.

Актуальность поиска компромиссных решений между производительностью и качеством предсказаний становится очевидной в условиях цифровой трансформации и возрастания требований к веб-приложениям. Такой подход, основанный на интеграции инновационных методов анализа данных и оптимизации алгоритмов, позволяет не только улучшить пользовательский опыт, но и обеспечить стабильность работы систем в динамично изменяющейся среде [9].

Расчёт оптимальных параметров

При разработке авторской модели на основе метода, предложенного в введении, ключевое преимущество заключается в сниженной вычислительной нагрузке. Однако уменьшение «веса» модели (за счёт меньшего количества обрабатываемых данных, определяемого параметром *historyLength* (HL), и более резкого затухания через параметр *decayRate* (DR)) может негативно сказаться на точности предсказания т.к. предсказание приводит к избыточной загрузке компонентов, что увеличивает общее время отклика системы.

В разработанной модели точность предсказания *A* определяется на основе ретроспективного анализа

исторических данных. Для каждого взаимодействия система делала предсказание следующего действия, и точность вычислялась по формуле 1.

$$A = \frac{\text{Количество корректных предсказаний}}{\text{Общее количество предсказаний}} \quad (1)$$

При анализе исторических данных для каждой конфигурации получены следующие значения:

- для минимальной конфигурации: $A=0,88$ (88 % корректных предсказаний);
- для средней конфигурации: $A=0,93$ (93 % корректных предсказаний);
- для максимальной конфигурации: $A=0,95$ (95 % корректных предсказаний).

Данные значения, получены в ходе 200 экспериментальных запусков на каждую конфигурацию в системах различной сложности, после которых были усреднены и вычислены по формуле (1).

Эти значения отражают, что более «тяжёлая» модель (с наибольшим количеством обрабатываемых данных) учитывает больше информации и, соответственно, точность предсказаний повышается, однако за счёт увеличения базового времени загрузки.

Модель тестировалась в трёх конфигурациях, для которых были получены следующие измеренные значения:

Минимальная конфигурация:

- параметры: $HL = 10$, $DR = 0,7$;
- базовое время загрузки компонента $Y=0,354$ сек;
- вычисленная точность предсказания $A=0,88$ (88 % корректных предсказаний).

Средняя конфигурация:

- Параметры: $HL = 50$, $DR = 0.8$.
- Базовое время загрузки компонента $Y=0.36$.
- Вычисленная точность предсказания $A=0.93$ (93 % корректных предсказаний).

Максимальная конфигурация:

- Параметры: $HL = 100$, $DR = 0.9$.
- Базовое время загрузки компонента $Y=0.374$ сек.
- Вычисленная точность предсказания $A=0.95$ (95 % корректных предсказаний).

Прослеживается прямая зависимость — от увеличения обработки данных, повышается длительность ожидания загрузки компонента, что имеет отрицательный эффект на изначально поставленную цель разработки модели предиктивного анализа.

Для оценки влияния неверных предсказаний введем понятие «штрафа» — P , представляющего дополнитель-

ное время загрузки из-за лишнего запроса. В эксперименте значение этого параметра составило $P=0.56$ сек. Данная величина также была получена путём вычитания времени загрузки одного компонента при верном предсказании из времени загрузки компонента с неверным предсказанием, когда параллельно загружаются необходимый компонент и компонент, который не нужен. Штраф рассчитывается по формуле 2.

$$Penalty = (1 - A) \times P. \quad (2)$$

Вычислим штраф для каждой конфигурации:

- для минимальной конфигурации:

$$Penalty = (1 - 0,88) \times 0,56 = 0,0672;$$

- для средней конфигурации:

$$Penalty = (1 - 0,93) \times 0,56 = 0,0392;$$

- для максимальной конфигурации:

$$Penalty = (1 - 0,95) \times 0,56 = 0,028.$$

Можно заметить, что значение штрафа прямо пропорционально уменьшается относительно сложности

модели (учитывая данный фактор и вывод из предыдущего блока вычислений).

Эффективное время загрузки Y_{eff} учитывает как базовое время Y , так и дополнительную задержку из-за неверных предсказаний, таким образом этот параметр вычисляется по формуле 3.

$$Y_{eff} = Y + Penalty. \quad (3)$$

Подставив значения в формулу 3, получим следующие значения, отображенные в таблице 1.

Таблица 1.

Полученные данные

Конфигурация	HL	RD	Y (сек)	A	Penalty (сек)	Y_{eff} (сек)
Минимальная	10	0.7	0.354	0.88	0.0672	0.4212
Средняя	50	0.8	0.36	0.93	0.0392	0.3992
Максимальная	100	0.9	0.374	0.95	0.028	0.402

Из данных таблицы следует, что несмотря на то, что базовое время загрузки минимальной конфигурации

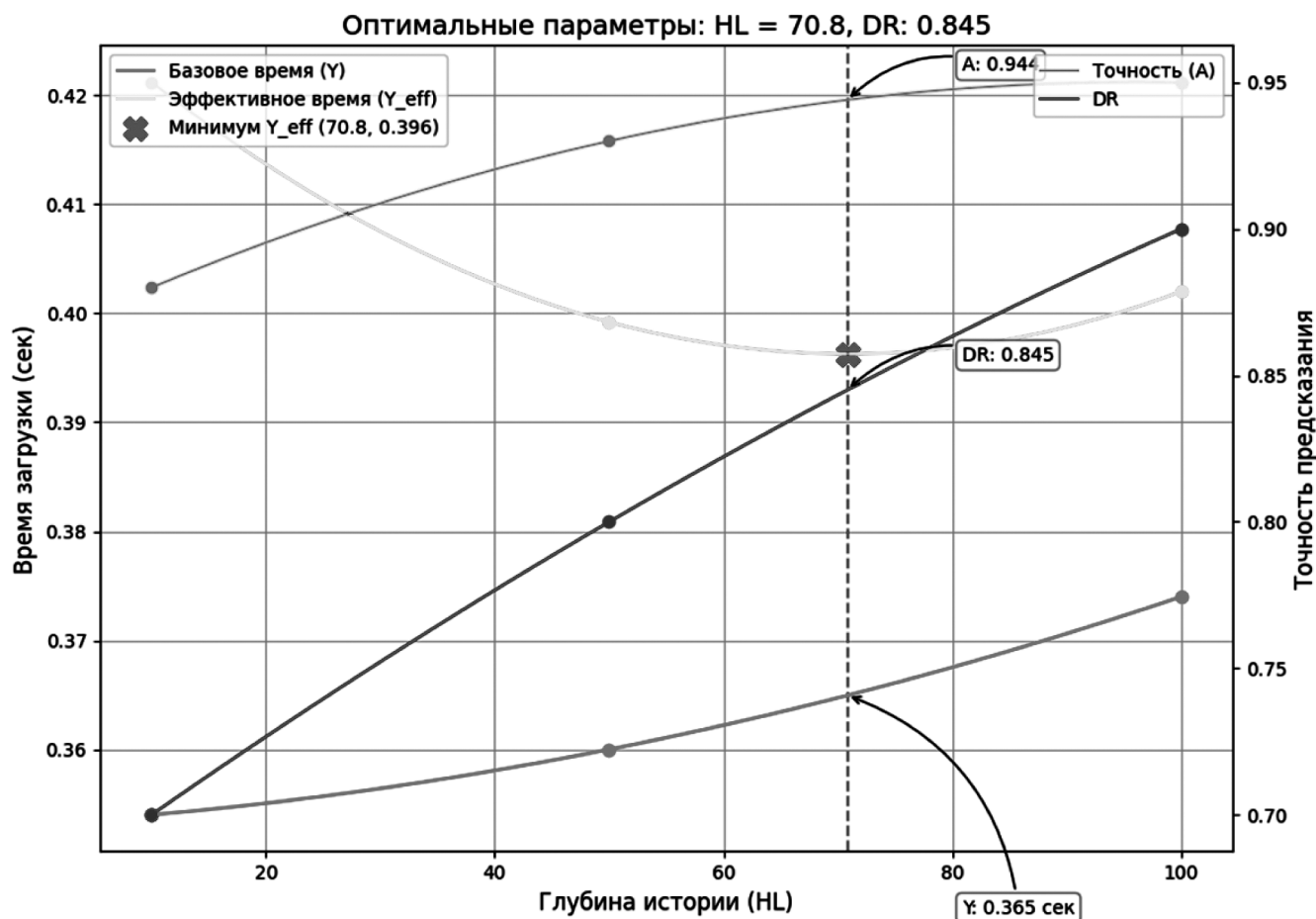


Рис. 1. Получение оптимальных параметров

наименьшее из всех, её относительно меньшая точность приводит к большому штрафу, и итоговое эффективное время составляет 0.4212 сек, что является наихудшим результатом среди всех. Средняя конфигурация, с $HL = 50$ и $DR = 0.8$, показывает оптимальное соотношение всех критериев: базовое время 0.36 сек и высокая точность (93 %) приводят к минимальному $Y_{eff} = 0.3992$ сек. Максимальная конфигурация, хоть и обладает наивысшей точностью, имеет немного большее базовое время, что даёт $Y_{eff} = 0.402$ сек.

На основе полученных данных, был построен график, который представлен на Рисунке 1.

Данный график был построен на основе вычислений, проведенных ранее. Точки на графике — результаты вычислений, через которые проведены оси, а также они были «сглажены» путем интерполяции данных с использованием полиномиальной аппроксимации. Далее была найдена минимальная точка экстремума на оси Y_{eff} и на основе этой точки были получены наилучшие значения для работы модели, а именно $historyLength (HL) = 70,8$ и $decayRate (DR) = 0,845$ при котором Y_{eff} будет принимать значение 0.396 сек.

Таким образом, были рассчитаны параметры для настройки модели предиктивного анализа, основанной на марковских цепях и механизме затухания. Используя эту модель веб-приложение, получит максимальную точность анализа действий пользователя, что, в свою очередь, приведёт к требуемой высокой скорости загрузки его компонентов.

Заключение

В работе проведено исследование параметров модели предсказательного анализа пользовательского поведения в клиент-серверном приложении, включающее построение регрессионной зависимости между ключевыми параметрами модели, такими как глубина истории (HL), коэффициент отсева (DR), время базовой загрузки компонента (Y), точность предсказания (A), а также штраф за неверные предсказания (P).

В ходе математического эксперимента определена закономерность, согласно которой увеличение глубины

истории модели влечет за собой как повышение точности предсказаний, так и увеличение времени загрузки компонентов. С использованием регрессионного анализа и последующего поиска оптимальных значений параметров определен баланс, при котором достигается минимальное значение эффективного времени загрузки (Y_{eff}), что критически важно для обеспечения высокой производительности всех систем, в которых будет интегрирована модель предиктивного анализа.

Результаты эксперимента показали, что при увеличении точности предсказания (A) происходит снижение количества неверных вызовов компонентов, что в свою очередь уменьшает избыточную нагрузку на серверную часть системы. В процессе анализа было проведено сглаживание полученных зависимостей для выявления минимальной точки скорости загрузки, что позволило определить оптимальное значение HL, при котором достигается наилучший компромисс между быстродействием и глубиной предсказательного анализа в модели предиктивного анализа, которая может быть использована в любом проекте и будет работать одинаково относительно тяжести компонентов веб-приложения.

Таким образом, в результате расчетов было получено оптимальное значение конфигурации предсказательной модели, при котором достигается максимальная эффективность работы системы:

- минимизация времени загрузки компонента при сохранении высокой точности предсказаний;
- уменьшение избыточных вызовов благодаря корректному прогнозированию пользовательских действий;
- достижение баланса между вычислительной сложностью модели и ее предсказательной мощностью.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для дальнейшего совершенствования системы предсказательного анализа пользовательского поведения, а также стать основой для разработки более адаптивных и интеллектуальных механизмов автоматического управления загрузкой компонентов в клиент-серверных приложениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скорость сайта и пользовательский опыт: Важная взаимосвязь: Suhrob Baxtiyorov. [Электронный ресурс]. URL: <https://dora.uz/ru/blog/skorost-saita-i-polzovatel'skii-opyt-vaznaia-vzaimosviaz> (дата обращения: 10.02.2025).
2. Akamai: секундная задержка загрузки сайта снижает конверсию на 20,5%. [Электронный ресурс]. URL: <https://m.seonews.ru/events/akamai-sekundnaya-zaderzhka-zagruzki-sayta-snizhaet-konversiyu-na-20-5/> (дата обращения: 10.02.2025).
3. Разработка методов и алгоритмов идентификации моделей поведения пользователей: Тимошенко А.И. URL: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/135788> (дата обращения: 13.02.2025).
4. Скрытая марковская цепь, условная Марковская цепь и Марковская цепь Блекуэлла: Бежаева З.И., Куликов В.Л., Олехова Е.Ф., Оселедец В.И. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35296619> (дата обращения: 13.02.2025).

5. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction: Trevor H., Robert T., Jerome F. URL: <https://hastie.su.domains/ElemStatLearn/> (дата обращения: 19.02.2025).
6. Deep Learning: Ian G., Yoshua B., Aaron C. URL: <https://www.deeplearningbook.org/> (дата обращения: 19.02.2025).
7. Алгоритм последовательных упрощений при оценке временной сложности алгоритмов с применением полумарковских моделей: Ларкин Е.В., Привалов А.Н., Клепиков А.К. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-posledovatelnyh-uproscheniy-pri-otsenke-vremennoy-slozhnosti-algoritmov-s-primeneniem-polumarkovskih-modeley> (дата обращения: 19.02.2025).
8. Марковские цепи в задачах диагностики и прогнозирования: Куравский Л.С. URL: https://psyjournals.ru/nonserialpublications/mmdp_2017/mmdp_2017.pdf (дата обращения: 19.02.2025).
9. Оптимизация интеграции технологий искусственного интеллекта в веб-приложения для улучшения пользовательского опыта: Бугрова О.А., Копша О.Ю. URL: <https://www.xn----8sbempclwd3bmt.xn--p1ai/article/19298> (дата обращения 19.02.2025).

© Ильин Андрей Юрьевич (frayz2507@gmail.com); Плотников Сергей Борисович (plotnikovsb@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРЕДИКТИВНЫЙ АНАЛИЗ МЕЖОТРАСЛЕВЫХ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ

PREDICTIVE ANALYSIS OF CROSS- SECTOR INNOVATION PROJECTS USING ADDITIVE TECHNOLOGIES IN HIGH-TECH INDUSTRIES

A. Kozhiev
V. Teslyuk

Summary. The article is devoted to the analysis of inter-industry innovation projects, which focus on additive technologies (hereinafter referred to as «AT») as a key element of transformation of production processes in high-tech industries. The article considers the essence of inter-industry cooperation as a form of cooperation that provides accelerated implementation of innovations within the framework of the open innovation concept. The paper emphasizes the importance of additive technologies for such industries as aerospace, automotive and medical instrumentation, as well as their role in the formation of new business models. The use of predictive analytical methods has allowed the development of the AT Adoption Potential Index (AAPI), which takes into account industry characteristics such as market size, growth rate, scale of adoption and competitive saturation. Based on the analysis of data from 50 projects, the most promising industries for large-scale AT deployment were identified. The results obtained can be used for strategic planning, prioritization of state support and formation of technological development roadmaps.

Keywords: predictive analysis, additive technologies, cross-industry innovation projects, integrated approach, prospectivity index for the introduction of additive technologies, strategic industry planning.

Кожиев Александр Юрьевич

Аспирант, Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», г. Москва
lion_1998@inbox.ru

Теслюк Владислав Сергеевич

Аспирант, Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», г. Москва
vladislav260100@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена анализу межотраслевых инновационных проектов, в фокусе которых находятся аддитивные технологии (далее — AT) как ключевой элемент трансформации производственных процессов в высокотехнологичных отраслях. Рассматривается сущность межотраслевого взаимодействия как формы кооперации, обеспечивающей ускоренное внедрение инноваций в рамках концепции открытых инноваций. Подчеркивается значимость аддитивных технологий для таких отраслей, как аэрокосмическая промышленность, автомобилестроение и медицинское приборостроение, а также их роль в формировании новых бизнес-моделей. Использование методов предиктивного анализа позволило разработать индекс перспективности внедрения AT (AAPI), учитывающий отраслевые характеристики, такие как объем рынка, темпы роста, масштаб внедрения и конкурентную насыщенность. На основе анализа данных 340 проектов выделены наиболее перспективные отрасли для масштабного внедрения AT. Полученные результаты могут быть использованы для стратегического планирования, определения приоритетов государственной поддержки и формирования дорожных карт технологического развития.

Ключевые слова: предиктивный анализ, аддитивные технологии, межотраслевые инновационные проекты, комплексный подход, индекс перспективности внедрения аддитивных технологий, стратегическое отраслевое планирование.

Современной тенденцией развития экономики является необходимость внедрения инноваций, имплементируемых на стыке отраслей, что обуславливает возникновение межотраслевых инновационных проектов. Межотраслевые инновационные проекты — форма кооперации, обеспечивающая взаимодействие субъектов из различных отраслей промышленности с целью создания синергетического эффекта, что впоследствии выражается в ускоренном развитии и внедрении технологических решений. Согласно концепции открытых инноваций, предполагается, что предприятия, задействованные в межотраслевых инновационных проектах, способны создавать инновации посредством

внутренних и внешних источников знаний и ресурсов, что приводит к более быстрому внедрению новых технологий, а также позволяет увеличить гибкость и адаптивность к изменениям на рынке [6].

Аддитивные технологии (далее — AT), как совокупность методов послойного производства изделий, представляют собой ключевое направление развития индустрии в рамках Индустрии 4.0. Использование аддитивных технологий существенно сокращает производственный цикл, снижает транзакционные издержки и предоставляет возможность кастомизации продукции. Авиакосмическая промышленность, робототехни-

ка и иные высокотехнологичные отрасли в настоящее время интегрируют аддитивные технологии в производственные процессы [8]. Данные трансформации традиционных производственных цепочек неизбежно ведут к появлению новых бизнес-моделей, что позволяет сделать вывод о том, что аддитивные технологии являются собой один из ключевых элементов новой волны технологического развития и трансформации производственной парадигмы.

Предиктивный анализ — совокупность статистических, математических и алгоритмических методов, направленных на построение прогнозных моделей и принятие обоснованных управленческих решений в условиях неопределенности. На основании данных представляется возможным прогнозирование эффективности новых технологий, моделирование рисков и угроз, а также разработка альтернативных сценариев осуществления инновационных проектов [3]. Основные методы, используемые в рамках предиктивного подхода, включают в себя машинное обучение, нейросетевые алгоритмы, регрессионные и кластерные модели, методы деревьев решений и байесовские сети. Вышеуказанные методы обеспечивают выработку стратегических решений, основанных на данных, объективных показателях, в условиях изменчивости внешней среды.

Высокотехнологичные отрасли характеризуются высокой наукоёмкостью, значительной долей инвестиций в научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки (НИОКР), а также постоянной необходимостью обновления производственно-технологической базы. Эти отрасли находятся в авангарде научно-технического прогресса и играют ключевую роль в формировании национальной конкурентоспособности [9]. В связи с этим применение инновационных подходов к управлению проектами и оценке их эффективности приобретает особую актуальность. Теоретическая база анализа включает в себя положения теории жизненного цикла технологий, модели технологического прогнозирования, теории управления знаниями, а также концепции цифровой трансформации и устойчивого развития.

В условиях нарастающей технологической трансформации приоритетным направлением промышленной политики становится стимулирование внедрения аддитивных технологий (АТ) как ключевого элемента перехода к цифровому производству [7]. Учитывая значительные межотраслевые различия в темпах и эффективности адаптации АТ, актуальной задачей является проведение предиктивного анализа на макроуровне с целью выявления отраслей с наибольшим потенциалом масштабного внедрения данных технологий.

Анализ межотраслевых инновационных проектов с использованием аддитивных технологий в высоко-

технологичных отраслях требует интеграции теоретических и методологических основ из различных научных направлений — от стратегического управления инновациями до прикладной информатики и анализа больших данных. Применение предиктивных аналитических моделей в данной области позволяет не только повысить точность оценки перспективности проектов, но и формирует предпосылки для повышения эффективности инновационного развития экономики в целом. Комплексный подход, включающий количественные и качественные методы анализа, обеспечивает полноту научного обоснования принимаемых управленческих решений.

Данные собраны из 340 межотраслевых инновационных проектов, реализованных в таких высокотехнологичных отраслях, как аэрокосмическая промышленность, производство медицинского оборудования и автомобилестроение. Массив данных включает качественные и количественные показатели.

Для обоснования выбора целевых отраслей при анализе перспектив внедрения АТ проведён сравнительный анализ ключевых промышленных секторов. В основу легли количественные и качественные параметры, отражающие текущий масштаб развития отраслей, а также уровень их технологической зрелости в контексте интеграции аддитивного производства.

В таблице 1 представлены агрегированные данные по шести отраслям промышленности, включая объём соответствующих рынков, среднегодовой темп роста, количество внедрённых единиц аддитивных технологий, а также оценку степени конкурентного насыщения. Эти параметры позволяют провести предварительную оценку привлекательности отраслей с точки зрения дальнейшего распространения АТ и выявить направления с наибольшим потенциалом для технологического роста.

Объём и структура актуальных данных в рамках настоящего исследования сформированы на основе сведений, доступных по состоянию на 2023 год. В качестве источников использованы аналитические материалы ведущих исследовательских и консалтинговых организаций в области рыночной аналитики (Data Horizon Research [5], Research Nester, International Information and Engineering Technology Association), а также публикации в профильных научных журналах (Ain Shams Engineering Journal [1], Additive Manufacturing and the Construction Industry Journal, Research and Markets [2]).

Целью практической части является разработка и тестирование прогностической модели для оценки вероятности успеха межотраслевых инновационных проектов с использованием аддитивных технологий в высокотехнологичных отраслях.

Таблица 1.

Описание массива данных

№ п.п.	Отрасль промышленности	Объем рынка	Темп роста отрасли (% в год)	Кол-во внедрённых единиц АТ	Конкурентное насыщение рынка
1	Аэрокосмическая промышленность	6.24 млрд долл. США	18.6 %	200 000	7 %
2	Автомобилестроительная промышленность	9.245	6.2 %	135 000	3 %
3	Медицинское приборостроение	8.5	18.1 %	43 000	14 %
4	Строительство	35.3	7.0 %	550 000	22 %
5	Робототехника	100.25	12.3 %	584 000	43 %
6	Энергетика	2.6	9.4 %	30 000	5 %

Для целей анализа разработан интегральный Индекс перспективности внедрения аддитивных технологий (АТ Adoption Potential Index, AAPI), рассчитываемый на основе нормализованных отраслевых показателей:

- объём рынка (млрд долл. США),
- среднегодовой темп роста отрасли (%),
- количество внедрённых единиц АТ (ед.),
- уровень конкурентного насыщения рынка (% компаний, действующих в отрасли).

Каждому показателю присвоены весовые коэффициенты, отражающие их относительное влияние на успех внедрения АТ:

рост отрасли — 35 %, масштаб текущего внедрения — 30 %, объём рынка — 20 %, уровень конкуренции (инвертированный) — 15 %.

Нормализуем значения так, чтобы лучшие значения по росту, внедрению АТ и объёму рынка увеличивали итоговый балл, а конкурентное насыщение — уменьшало.

Таблица 2.

Расчет нормализованных значений (min-max scaling)

Отрасль	Norm: Рынок	Norm: Рост	Norm: Внедр. АТ	Norm: Конкуренция (инверсия)
Аэрокосмическая промышленность	0.037	1.000	0.305	0.872
Автомобилестроение	0.067	0.119	0.203	0.953
Медицинское приборостроение	0.059	0.968	0.032	0.767
Строительство	0.329	0.156	0.955	0.558
Робототехника	1.000	0.602	1.000	0.000
Энергетика	0.000	0.370	0.000	0.907

Для получения интегральной оценки потенциала отрасли в контексте внедрения аддитивных технологий был разработан агрегированный индекс, учитывающий как позитивные, так и сдерживающие факторы. В качестве положительно влияющих показателей были выбраны темпы роста, уровень внедрения аддитивных технологий и объём рынка, тогда как уровень конкурентного насыщения был инвертирован ввиду его потенциально ограничивающего воздействия. Все показатели предварительно были нормализованы по методу min-max scaling, что позволило привести значения к единой шкале [0–1] и обеспечить корректность дальнейшего агрегирования.

С учетом экспертной оценки значимости каждого из критериев, агрегированный индекс отраслевого потенциала (AAPI — Additive Adoption Potential Index) рассчитывался по следующей формуле:

$$AAPI = 0.35 * \text{Norm(Рост)} + 0.30 * \text{Norm(Внедрения)} + 0.20 * \text{Norm(Рынок)} + 0.15 * (1 - \text{Norm(Конкуренция)}) \quad (1)$$

Полученное значение AAPI отражает совокупную оценку потенциала каждой отрасли для активного освоения аддитивных технологий и может использоваться для сравнительного анализа и стратегического планирования.

На основе расчётов значений индекса AAPI отрасли были ранжированы по уровню перспективности внедрения аддитивных технологий (см. табл. 3).

Более наглядно данные представлены на графике ниже (см. рис. 1).

Полученные результаты свидетельствуют о наиболее благоприятных условиях для развития АТ в робототехнике и аэрокосмической промышленности, что обусловлено высокой динамикой роста, масштабом рынка

Таблица 3.
Результаты предиктивного анализа

Отрасль	AAPi (0–1)	Качественная оценка
Робототехника	0.612	Очень высокая перспективность
Аэрокосмическая промышленность	0.539	Высокая
Строительство	0.477	Умеренная
Медицинское приборостроение	0.445	Средняя
Автомобилестроение	0.235	Низкая
Энергетика	0.147	Очень низкая

и умеренным уровнем конкурентной насыщенности. Сектор строительства демонстрирует высокий уровень текущего внедрения, но страдает от конкурентной фрагментации, что снижает потенциал монетизации внедряемых решений. Медицинское приборостроение обладает высоким темпом роста, однако пока отстаёт по масштабу применения АТ.

Отрасли с наименьшими значениями индекса (энергетика, автомобилестроение) демонстрируют структурную инерцию и слабо адаптированы к быстрому внедрению АТ, несмотря на общий технологический прогресс.

Разработанный подход может использоваться в качестве инструмента стратегического отраслевого планирования, в том числе для:

- приоритизации государственных программ поддержки (гранты, субсидии);
- стратегической оценки точек роста для венчурных и промышленных инвестиций;
- формирования дорожных карт технологического развития отраслей;
- мониторинга цифровой зрелости отраслей в рамках реализации программ НТИ и «Цифровой экономики».

В дальнейших исследованиях предполагается расширение перечня отраслей, добавление временного аспекта (динамика за 3–5 лет), а также включение институциональных факторов, таких как участие в кластерах, уровень локализации производства и наличие целевых государственных программ.

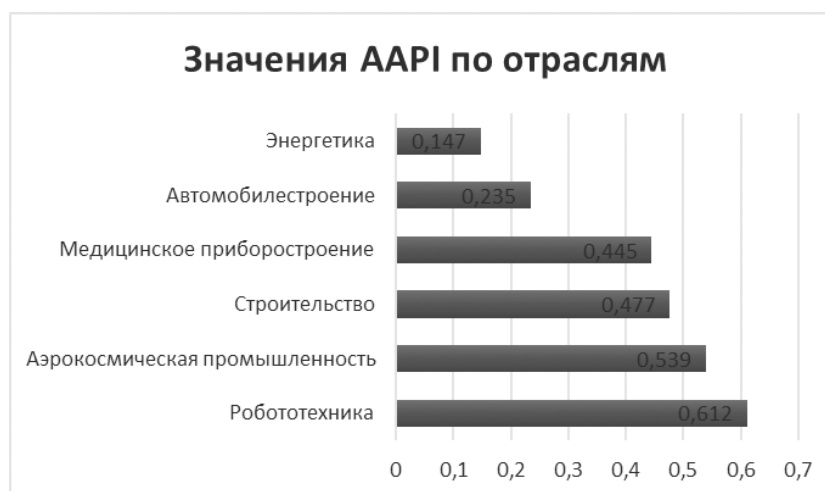


Рис. 1. Значения индекса AAPi по отраслям

ЛИТЕРАТУРА

1. Abdul Hai Alami, Abdul Ghani Olabi, Adnan Alashkar, Shamma Alasad, Haya Aljaghoub, Hegazy Rezk, Mohammad Ali Abdelkareem. Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goals // Ain Shams Engineering Journal. 2023. Vol. 14, Issue 11. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447923004057>.
2. Additive Manufacturing Market: Global Industry Size, Share, Trends, Opportunity & Forecast, 2019–2029 // Research and Markets. 2024. P. 1–186.
3. Adesina A., Iyelolu T., Paul P. Leveraging predictive analytics for strategic decision-making: Enhancing business performance through data-driven insights // World Journal of Advanced Research and Reviews. 2024. Vol. 22. P. 1927–1934.
4. Al-Kheetan M., Ghaffar S. Additive Manufacturing and the Construction Industry. 2023. Chapter 7. P. 97–109.
5. Machinery & Equipment. Market research report // Data Horizon Research. 2024. P. 1–145.
6. Shi J., Xiao Z. Research on the Impact of Inter-Industry Innovation Networks on Collaborative Innovation Performance: A Case Study of Strategic Emerging Industries // Systems. 2024. Vol. 12, No. 6. P. 211.
7. Горин Е.А. Современная промышленная политика: факторы трансформации // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. № 9. С. 218–227.
8. Соколова П.Н., Дегтерев Д.В. Аддитивные технологии: новационный эффект в промышленности // Вестник ВГУИТ. 2020. № 4 (86). С. 347–353.
9. Соколенко В.Э. Опыт развития инновационной деятельности в странах ОЭСР // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2018. Т. 8. № 9А. С. 293–308.

© Кожиев Александр Юрьевич (lion_1998@inbox.ru); Теслюк Владислав Сергеевич (vladislav260100@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РАСПРЕДЕЛЁННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МНОЖЕСТВЕННЫХ ВЫРАВНИВАНИЙ СИМВОЛЬНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ МЕТОДОМ MAHDS

DISTRIBUTED SYSTEM FOR MULTIPLE SEQUENCE ALIGNMENT BY MEANS OF MAHDS METHOD

**D. Kostenko
E. Korotkov
M. Korotkova**

Summary. The search for the optimal multiple sequence alignment requires a large amount of computing resources. Previously, we developed the MAHDS method, which is capable of constructing statistically significant alignments of weakly homologous sequences. This paper presents the architecture and some details of the software implementation of the system for constructing multiple alignments using this method. An effective hierarchical approach used for distributing computations in an MPI cluster environment is described. An approach is proposed to ensure secure access of the end users of the system to the computing cluster resources.

Keywords: multiple sequence alignment, distributed computing, computing cluster, MPI, thread pool.

Костенко Дмитрий Олегович

Аспирант, младший научный сотрудник,
Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ» (Москва);
Федеральный исследовательский центр
«Фундаментальные основы биотехнологии» РАН
(Москва)

dk0stenko@yandex.ru

Коротков Евгений Вадимович

Доктор биологических наук, профессор,
Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ» (Москва); Федеральный
исследовательский центр «Фундаментальные основы
биотехнологии» РАН (Москва)

bioinf@yandex.ru

Короткова Мария Александровна

Кандидат технических наук, доцент,
Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ» (Москва)
discretmath@gmail.com

Аннотация. Поиск оптимального множественного выравнивания символьных последовательностей требует затраты большого объёма вычислительных ресурсов. Ранее нами был разработан метод MAHDS, способный строить статистически значимые выравнивания слабо гомологичных последовательностей. В данной работе представлена архитектура и некоторые детали программной реализации системы для построения множественных выравниваний этим методом. Описан эффективный иерархический подход, использующийся для распределения вычислений в среде MPI кластера. Предложен способ обеспечения безопасного доступа конечного пользователя системы к ресурсам вычислительного кластера.

Ключевые слова: множественное выравнивание, распределённые вычисления, вычислительный кластер, MPI, thread pool.

Введение

Множественные выравнивания символьных последовательностей (MSA) могут применяться для сравнения разнообразных объектов, представимых в виде символьных последовательностей с произвольным алфавитом A . Исходное множество последовательностей обозначим S , его элементы: $S_1, S_2, \dots, S_n$, а их длины соответственно $L_1, L_2, \dots, L_n$. Предположим, что последовательности $S_1, S_2, \dots, S_n$ (или отдельные их участки) получены из одной неизвестной

первоначальной последовательности S_{par} длины L путём внесения в неё мутаций: замен, вставок и удалений (делений) символов. Задача построения MSA состоит в нахождении мутаций в исследуемых последовательностях, которые привели к их расхождению. Последовательности $S_1, S_2, \dots, S_n$ при этом дополняются вхождениями специального символа «-», который ставится в соответствие удалённым в данной последовательности символам или вставленным символам в другой последовательности. Итоговое выравнивание представлено дополненными исходными последовательностями, длины которых ста-

новятся одинаковыми (обозначим длину выравнивания $L_a \geq L$).

Можно найти разные практические приложения задачи MSA, например, в [1] описано применение к валютным рядам подхода, использующегося для построения выравниваний. Однако основной областью применения MSA является биоинформатика. Первичные структуры ДНК/РНК и белков представляются символьными последовательностями с алфавитами, включающими в себя 4 и 20 символов соответственно. MSA позволяет обнаруживать структурные и функциональные взаимосвязи таких последовательностей и используется для решения многих задач биоинформатики. В частности, MSA применяется в работе модели AlphaFold [2,3], предсказывающей структуры белков, за разработку которой была присуждена Нобелевская премия по химии в 2024 году.

Несмотря на практическую значимость MSA, на данный момент не был разработан идеальный метод решения этой задачи. Это связано с тем, что задача построения множественного выравнивания является NP-полной в большинстве постановок [4], следовательно алгоритм её решения имеет экспоненциальную сложность, неприемлемую для применения на практике. В биоинформатике для построения множественных выравниваний применяются различные эвристические алгоритмы, имеющие сложность не более полиномиальной [5–9]. Однако даже при сравнительно хорошей асимптотике использующихся алгоритмов, решение реальных задач обычно сопряжено с распределёнными вычислениями, так как объём обрабатываемых данных может быть очень велик.

Ранее нами был разработан метод MAHDS, отличительной особенностью которого является способность строить статистически значимые выравнивания последовательностей, накопивших большое количество мутаций [10]. Если зафиксировать максимальную длину входных последовательностей и в качестве переменной рассматривать количество последовательностей n , тогда алгоритм MAHDS будет иметь временную и пространственную сложность $O(n)$. Если же наоборот зафиксировать количество последовательностей и варьировать их максимальную длину m , тогда алгоритм обладает сложностью $O(m^2)$, таким образом можно считать, что алгоритм имеет асимптотику $O(d^2)$, где d — объём входных данных [11]. По определению это означает, что $\exists C \in (0, +\infty) \exists d_0 \forall d : d > d_0 f(d) \leq Cd^2$, где $f(d)$ — функция зависимости времени работы алгоритма (или количества элементарных операций) от объёма входных данных, C — положительная константа. Помимо большого количества и длины последовательностей, характерных для реальных биоинформатических приложений, порядок величины C обуславливает необходимость в су-

щественном объёме вычислительных ресурсов для решения задачи MSA за приемлемое время. Поэтому при разработке программной реализации MAHDS особое внимание уделялось эффективности использования вычислительных ресурсов и обеспечению горизонтальной масштабируемости на узлах вычислительного MPI кластера.

Алгоритм MAHDS

В рамках данной статьи будет дано только краткое описание MAHDS с акцентом на аспектах, важных для программной реализации. Подробное описание метода представлено в работах [10,11].

Идея MAHDS состоит в сведении задачи построения оптимального выравнивания последовательностей из множества S к задаче оптимизации позиционно-весовых матриц (PWM). PWM — это матрица размерности $|A| \times L$, строки которой соответствуют символам исходного алфавита A , а столбцы — столбцам в MSA без учёта вставок (такие позиции в выравнивании также соответствуют символам предполагаемого «общего предка» S_{par}). Для удобства будем кодировать символы алфавита A целыми числами на отрезке $[1, |A|]$. Чем больше величина элемента $PWM(i, j)$, тем больше вероятность, что $S_{par}(j) = i$, и тем больше поощряется пометка i в j -тую позицию MSA.

Используя в качестве входных данных произвольную PWM и множество последовательностей S можно построить MSA. Для этого с использованием подхода, подобного алгоритму Нидлмана-Вунша [12] строятся парные выравнивания каждой последовательности S_i ($i = 1..n$). Все последовательности из S выравниваются со специальной последовательностью S_a вида $1, 2, \dots, L$, символы которой соответствуют позициям в MSA, а в качестве матрицы замен [13] используется PWM. Полученные парные выравнивания накладываются таким образом чтобы одинаковые символы выровненных S_a попали в одни и те же столбцы, после чего S_a удаляется и остаётся MSA. При построении каждого парного выравнивания вычисляется значение функции сходства F_i ($i = 1..n$). Показателем качества PWM и соответствующего MSA является сумма этих величин $FS = \sum_{i=1}^n F_i$.

По известному MSA достаточно просто восстановить PWM, в некоторой мере подходящую для выравнивания данных последовательностей. Для этого по MSA рассчитывается частотная матрица, которая далее нормализуется как показано в [14], после чего может рассматриваться в качестве PWM. Такое преобразование позволяет итеративно оптимизировать PWM для построения наи-

лучшего MSA. На каждой итерации PWM применяется для построения MSA, после чего по полученному выравниванию восстанавливается новая версия PWM, лучше подстроенная под последовательности S . Целевой функцией оптимизации является FS , а критерием останова — прекращение роста целевой функции.

Эмпирически было проверено, что итеративная процедура практически всегда сходится менее чем за 10 итераций, поэтому их количество можно считать константой. Однако при оптимизации PWM имеется тенденция к попаданию в локальные максимумы, поэтому для нахождения наилучшей PWM сначала генерируется множество Q случайных инициализирующих матриц той же размерности, что и PWM (по умолчанию $|Q| = 400$). Эти матрицы рассматриваются как точки в пространстве размерности $L * |A|$, и процедура их генерации максимизирует минимальное Евклидово расстояние между матрицами. К каждой инициализирующей матрице из множества Q после нормализации применяется итеративная процедура оптимизации; PWM с наибольшим значением FS рассматривается как оптимальная и применяется для построения результирующего MSA.

Статистическая значимость MSA_0 и соответствующей PWM_0 оценивается по методу Монте-Карло, предложенному в [15]. Для этого для этого символы последовательностей из множества S многократно перемешиваются и полученные последовательности выравниваются с помощью PWM_0 . Статистическая значимость вычисляется по формуле $Z = \frac{FS_0 - \overline{FS}}{\sigma FS}$, где $\overline{FS}$ — оценка математического ожидания FS , σFS — оценка среднеквадратичного отклонения FS для перемешанных S .

Оптимальная величина L изначально неизвестна. Поэтому для нахождения наиболее оптимального MSA мы вынуждены перебирать множество L_s значений L . Здесь критерием наилучшего MSA является наибольшая статистическая значимость Z , так как величина FS при разных L может масштабироваться. Обычно оптимальное значение L близко к средней длине выравниваемых последовательностей $\bar{L} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n L_i}{n} \right]$. Поэтому наиболее осмысленный вид множества:

$$L_s = \{L | (\bar{L} - \Delta L \leq L \leq \bar{L} + \Delta L) \& (L \bmod s = 0)\},$$

где ΔL — максимальное отклонение от среднего значения, s — шаг.

Параллельные вычисления в программной реализации MAHDS

Из представленного описания алгоритма видно, что его параллельное исполнение может быть организо-

вано на нескольких уровнях вложенности при выполнении следующих процедур: вычисление наилучших PWM при разных значениях L ; выравнивание множеств перемешанных последовательностей при вычислении Z ; итеративная оптимизация матриц из множества Q ; Построение парных выравниваний для каждой последовательности из множества S ; двумерное динамическое программирование при построении парных выравниваний. Для минимизации затрат вычислительных ресурсов, затрачиваемых непосредственно на организацию параллельных вычислений, использовались только два верхних уровня вложенности.

Программная реализация MAHDS изначально разрабатывалась в виде консольного MPI приложения для CPU кластеров. Использование MPI продиктовано исключительно его распространённостью и, во многих случаях, безальтернативностью в контексте применения вычислительных кластеров научных и образовательных организаций. Программный код написан на языке C++ для достижения наибольшей производительности.

Интенсивный обмен данными между MPI процессами, работающими на разных узлах кластера, требует передачи этих данных по сети, что может существенно замедлять вычисления. По этой причине мы минимизируем количество MPI процессов и распределяем между ними только максимально независимые вычисления самого верхнего уровня вложенности. Мы создаём только по одному MPI процессу на каждый доступный узел кластера. В свою очередь, каждый такой процесс применяет потоки операционной системы для эффективного использования ресурсов узла. Таким образом, кроме иерархичности (вложенности) процедур, подходящих для параллельного исполнения, естественным образом возникает и иерархичность исполнителей. Ниже представлена схема их соответствия (см. рис. 1).

На представленной схеме ромбами обозначены распараллеливающиеся циклы. Кругами обозначены точки синхронизации. Длинным пунктиром обозначено использование MPI процессов для распределения вычислений. Линией из точек обозначено параллельное исполнение с помощью потоков операционной системы. Коротким пунктиром обозначено комбинированное применение обоих способов распараллеливания для предварительной генерации инициализирующих матриц. Свойства множества инициализирующих матриц зависят только от мощности алфавита A и величины L , поэтому матрицы бессрочно кешируются в базе данных для повторного использования при следующих запусках программы.

Нельзя точно предсказать, сколько времени займёт итеративная процедура оптимизации PWM полученной из инициализирующей матрицы. По этой причине для

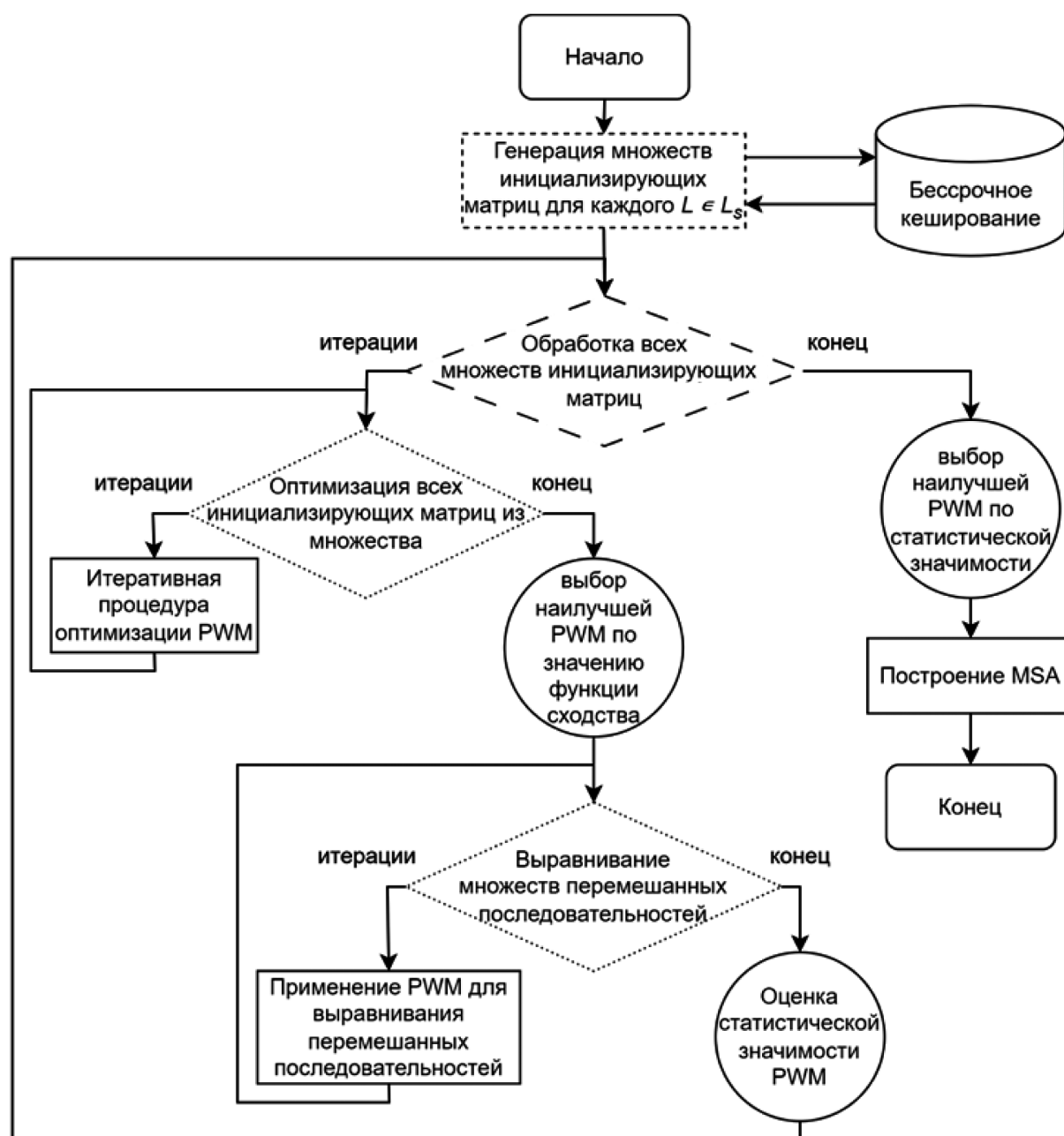


Рис. 1. Параллельное исполнение MAHDS

того, чтобы большую часть времени все физические ядра вычислительных узлов были заняты полезными вычислениями, мы применяем пул потоков (thread pool) [16]. Задачи на оптимизацию каждой инициализирующей матрицы помещаются в очередь, а «работники», закреплённые за потоками, по готовности их извлекают из очереди и исполняют.

Архитектура программной системы для построения выравниваний

Для того чтобы позволить конечному пользователю, не имеющему доступа к какому-либо вычислительному кластеру, строить множественные выравнивания доста-

точно быстро, была разработана программная система, развёрнутая в данный момент на кластере группы математического анализа последовательностей ДНК и белков ФИЦ Биотехнологии РАН. Система предоставляет возможность строить и оценивать множественные выравнивания через веб-интерфейс, не имея непосредственного доступа к кластеру. Пользователь может послать одновременно ограниченное количество задач на исполнение, после чего каждая задача будет некоторое время (от десятков секунд до десятков часов в зависимости от количества и длины последовательностей) обрабатываться, и результат вычислений будет доступен в течение недели после его получения. Запуск задач доступен только для зарегистрированных авторизованных



Рис. 2. UML диаграмма компонентов системы для построения множественных выравниваний методом MAHDS

пользователей с подтверждённым адресом электронной почты. Выше представлена UML диаграмма компонентов системы (см. рис. 2).

При добавлении задачи пользователем, запрос с клиентской части веб-приложения (написана на Vue 3) отправляется по протоколу HTTP на веб-сервер (в нашем случае Apache). Серверная часть веб-приложения реализована на Python с использованием фреймворка Flask, поэтому стандартом взаимодействия между Apache и приложением является WSGI. Серверная часть веб-приложения предоставляет REST API и не хранит состояние, из-за чего непосредственно в рамках данного компонента крайне сложно контролировать выполнение задач на кластере. В нашей системе эту функцию берёт на себя демон (служба) контроля выполнения задач (написан на Python и добавлен в systemd). Если запрос, отправленный клиентом, проходит валидацию на сервере, задача записывается в базу данных (используется СУБД SQLite) и проверяется состояние демона (при необходимости он запускается), а клиенту возвращается ссылка на страницу, где будет размещён результат.

Демон контроля выполнения задач постоянно работает в фоновом режиме и извлекает задачи из базы данных в порядке их добавления, готовит всё необходимое окружение для работы программы, реализующей MAHDS, и ставит задачи в очередь кластера с помощью менеджера ресурсов кластера (в нашем случае Slurm). Также демон контроля выполнения задач отвечает за ожидание результатов вычислений и погружение этих результатов в базу данных веб-приложения. Кроме того, в задачи демона входит удаление старых результатов и ограничение объёма ресурсов, потребляемых систе-

мой для построения выравниваний (та же самая очередь задач кластера может использоваться параллельно и для других задач). Особое внимание при реализации данного компонента уделялось обработке любых возможных ошибок, так как демон контроля выполнения задач должен работать в бесконечном цикле без сбоев.

Расположение компонентов на диаграмме, представленной на рисунке 2, отражает особенности развёртывания программной системы. Первая строка соответствует устройству клиента, через которое осуществляется доступ к системе. На второй строке представлены компоненты, развёрнутые на веб-сервере. Компоненты на третьей строке развёрнуты на управляющем и вычислительных узлах кластера в общем дисковом пространстве, реализованном с помощью NFS.

Обсуждение и результаты

Нами была разработана распределённая программная система для построения множественных выравниваний методом MAHDS. Был предложен иерархический подход к организации параллельных вычислений, который позволил минимизировать объём передаваемых по сети данных, сократить время блокирования на примитивах синхронизации и обеспечить эффективное использование всех доступных вычислительных ресурсов. Для обеспечения безопасного доступа конечных пользователей к программной реализации MAHDS, развёрнутой на вычислительном кластере, было разработано веб-приложение (доступно по ссылке <http://victoria.biengi.ac.ru/mahds>) и демон, контролирующий выполнение задач. Задачи пользователей попадают сначала в очередь задач приложения, после чего, согласно своей

конфигурации, демон добавляет их в очередь задач кластера с ограничениями по доступным ресурсам. Таким образом работа системы для построения выравниваний не мешает использованию той же самой очереди задач кластера для других целей.

При разработке программной реализации MAHDS приоритетной целью было обеспечение максимальной производительности. Для других компонентов системы

такая задача не стояла, так как построение выравниваний является бутылочным горлышком системы.

Вычисления в разных областях науки часто сопряжены с использованием CPU кластеров. Представленные в данной работе решения могут применяться для разработки доступных вычислительных инструментов для учёных и инженеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коротков Е.В., Короткова М.А. Разработка математического метода для поиска скрытой периодичности в аминокислотных последовательностях белков с учётом делеций и вставок: 6 // Биофизика. 2015. Vol. 60, № 6. P. 1057–1068.
2. Jumper J. et al. Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold: 7873 // Nature. Nature Publishing Group, 2021. Vol. 596, № 7873. P. 583–589.
3. Abramson J. et al. Accurate structure prediction of biomolecular interactions with AlphaFold 3 // Nature. Nature Publishing Group, 2024. Vol. 630, № 8016. P. 493–500.
4. Wang L., Jiang T. On the complexity of multiple sequence alignment.: 4 // J Comput Biol. United States, 1994. Vol. 1, № 4. P. 337–348.
5. Katoh K. et al. MAFFT: a novel method for rapid multiple sequence alignment based on fast Fourier transform // Nucleic Acids Res. 2002. Vol. 30, № 14. P. 3059–3066.
6. Edgar R.C. MUSCLE: multiple sequence alignment with high accuracy and high throughput // Nucleic Acids Res. 2004. Vol. 32, № 5. P. 1792–1797.
7. Notredame C., Higgins D.G., Heringa J. T-coffee: A novel method for fast and accurate multiple sequence alignment: 1 // Journal of Molecular Biology. 2000. Vol. 302, № 1. P. 205–217.
8. Sievers F., Higgins D.G. Clustal Omega for making accurate alignments of many protein sequences // Protein Science. 2018. Vol. 27, № 1. P. 135–145.
9. Lassmann T., Frings O., Sonnhammer E.L.L. Kalign2: high-performance multiple alignment of protein and nucleotide sequences allowing external features // Nucleic Acids Res. 2009. Vol. 37, № 3. P. 858–865.
10. Korotkov E.V. et al. Multiple Alignment of Promoter Sequences from the Arabidopsis thaliana L. Genome: 2 // Genes. 2021. Vol. 12, № 2. P. 135.
11. Korotkov E.V., Kostenko D.O. Application of the MAHDS Method for Multiple Alignment of Highly Diverged Amino Acid Sequences: 7 // International Journal of Molecular Sciences. 2022. Vol. 23, № 7.
12. Needleman S.B., Wunsch C.D. A general method applicable to the search for similarities in the amino acid sequence of two proteins: 3 // Journal of Molecular Biology. Academic Press, 1970. Vol. 48, № 3. P. 443–453.
13. Mount D.W. Comparison of the PAM and BLOSUM Amino Acid Substitution Matrices // Cold Spring Harb Protoc. Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2008. Vol. 2008, № 6. P. pdb.ip59.
14. Pugacheva V., Korotkov A., Korotkov E. Search of latent periodicity in amino acid sequences by means of genetic algorithm and dynamic programming: 5 // Statistical Applications in Genetics and Molecular Biology. 2016. Vol. 15, № 5.
15. Comet J.P. et al. Significance of Z-value statistics of Smith-Waterman scores for protein alignments: 3–4 // Comput Chem. 1999. Vol. 23, № 3–4. P. 317–331.
16. Shoshany B. A C++17 thread pool for high-performance scientific computing // SoftwareX. 2024. Vol. 26. P. 101687.

© Костенко Дмитрий Олегович (dkostenko@yandex.ru); Коротков Евгений Вадимович (bioinf@yandex.ru);

Короткова Мария Александровна (discretmath@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СВОЙСТВА МЕТОДА MAHDS С УЧЁТОМ КОРРЕЛЯЦИЙ СИМВОЛОВ В КОНТЕКСТЕ ВЫРАВНИВАНИЯ АМИНОКИСЛОТНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

PROPERTIES OF THE MAHDS METHOD CONSIDERING CHARACTER CORRELATIONS IN THE CONTEXT OF AMINO ACID SEQUENCES ALIGNMENT

**D. Kostenko
E. Korotkov
M. Korotkova**

Summary. One of the most important tasks in bioinformatics is multiple sequence alignment of nucleotide and amino acid sequences. Previously, we proposed a new mathematical method for the alignment of highly divergent sequences (MAHDS). In this study, the method was adapted to align amino acid sequences using information about correlations of neighboring symbols. Using model amino acid sequences, we have investigated some properties of the method that may allow one to choose the most appropriate parameters for its practical application. The data which make it possible to evaluate the effectiveness and convergence of an optimization procedure that maximizes the sequences similarity function in alignment is presented. The properties of distributions of alignment quality indicators at different stages of MAHDS are described.

Keywords: multiple sequence alignment, dynamic programming, objective function optimization, distribution.

Костенко Дмитрий Олегович

Аспирант, младший научный сотрудник,
Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ» (Москва);
Федеральный исследовательский центр
«Фундаментальные основы биотехнологии» РАН
(Москва)

dk0stenko@yandex.ru

Коротков Евгений Вадимович

Доктор биологических наук, профессор,
Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ» (Москва);
Федеральный исследовательский центр
«Фундаментальные основы биотехнологии» РАН
(Москва)

bioinf@yandex.ru

Короткова Мария Александровна

Кандидат технических наук, доцент,
Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ» (Москва)
discretmath@gmail.com

Аннотация. Одной из важнейших задач в биоинформатике является построение множественных выравниваний нуклеотидных и аминокислотных последовательностей. Ранее нами был предложен новый математический метод выравнивания сильно дивергированных последовательностей (MAHDS). В данной работе метод был адаптирован для выравнивания аминокислотных последовательностей с использованием информации о корреляциях соседних символов. На модельных аминокислотных последовательностях мы исследовали некоторые свойства метода, которые могут позволить выбирать наиболее подходящие параметры при его практическом применении. Представлены данные, позволяющие оценить эффективность и сходимость оптимизационной процедуры, максимизирующей функцию сходства последовательностей в выравнивании. Описаны свойства распределений показателей качества выравниваний на разных этапах MAHDS.

Ключевые слова: множественное выравнивание, динамическое программирование, оптимизация целевой функции, распределение.

Введение

Множественное выравнивание символьных последовательностей (MSA) позволяет найти наиболее вероятные мутации (вставки, удаления и замены символов), которые предположительно породили данные последовательности из неизвестного

общего предка (в физическом мире такой предок мог и не существовать, это математическая абстракция, обуславливающая сходство последовательностей). Благодаря этому в последовательностях выявляются подобные компоненты, что позволяет аннотировать и предсказывать структуру биологических последовательностей, таких как ДНК/РНК и белки [1].

Было показано, что задача построения MSA является NP-полной [1,2], следовательно не существует алгоритма её решения, имеющего не экспоненциальную сложность. По этой причине на практике для построения MSA используют различные эвристики, позволяющие получить приближённое решение за приемлемое время [1,3–5]. Большинство популярных методов MSA используют разные вариации прогрессивного подхода [6–10]. Его недостатком является то, что даже небольшие неточности в парных выравниваниях накапливаются и существенно влияют на итоговое MSA в случае выравнивания сильно дивергированных последовательностей. Ранее мы разработали собственный метод MAHDS, который избежал данной проблемы, отказавшись от прогрессивного подхода. Метод уже показал себя успешно при выравнивании промоторных последовательностей [11] и белковых семейств с низкой степенью гомологии [12,13].

Ранее использование информации о корреляциях соседних символов в контексте MAHDS было возможно только в отношении нуклеотидных последовательностей. Мы адаптировали метод, чтобы это стало возможно и для аминокислотных последовательностей и провели серию экспериментов на модельных аминокислотных последовательностях, чтобы исследовать некоторые зависимости и распределения показателей, вычисляющихся при использовании метода MAHDS. Полученные данные позволяют корректно оценивать выравнивания реальных белковых последовательностей.

Обозначения и постановка задачи выравнивания

Рассмотрим две последовательности символов, принадлежащих алфавиту A . Обозначим эти последовательности S_1 и S_2 и будем индексировать их символы начиная с 1, например, $S_1[1] \in A$ — первый символ последовательности S_1 . Функцию, принимающую в качестве аргумента последовательность и возвращающую её длину обозначим L . Тогда чтобы получить парное выравнивание последовательностей S_1 и S_2 , необходимо дополнить их специальными символами — гэпами (обычно это символ «-») таким образом, чтобы для получившихся последовательностей $\bar{S}_1$ и $\bar{S}_2$ выполнялось $L(\bar{S}_1) = L(\bar{S}_2) = L_{SA}$, где L_{SA} — длина выравнивания. Для удобства будем кодировать символы алфавита A числами $1, 2, \dots, |A|$. Расширенный алфавит, включающий в себя гэп, обозначим $\bar{A}$, $|\bar{A}| = |A| + 1$, а гэп будем кодировать числом 0. Тогда если $\bar{S}_1[i] = 0$, а $\bar{S}_2[i] \neq 0$, говорят, что в этой позиции у $\bar{S}_1$ deletion (удаление) символа либо у $\bar{S}_2$ вставка символа. Если $\bar{S}_1[i] \neq 0$, $\bar{S}_2[i] \neq 0$ и $\bar{S}_1[i] = \bar{S}_2[i]$, говорят, что символы совпадают, а если при этом $\bar{S}_1[i] \neq \bar{S}_2[i]$, значит в данной позиции замена. Случай, когда $\bar{S}_1[i] = \bar{S}_2[i] = 0$ не имеет смысла.

Матрица замен с размерностью $|A| \times |A|$ устанавливает вес выравнивания символа x с символом y . Обозначим соответствующую весовую функцию $s(x, y)$. Тогда вес

выравнивания S_1 и S_2 : $F = \sum_{i=1}^{L(\bar{S}_1)} s(\bar{S}_1[i], \bar{S}_2[i])$, где s определена на гэпах следующим образом. Если $\bar{S}_1[i] = 0$, тогда $s(\bar{S}_1[i], \bar{S}_2[i]) = -d$, где d — величина штрафа за начало разрыва, но если при этом $\bar{S}_1[i-1] = 0$, тогда $s(\bar{S}_1[i], \bar{S}_2[i]) = -e$, где e — величина штрафа за продолжение разрыва (обычно $d > e$); аналогично для $\bar{S}_2$. В оптимальном парном выравнивании гэпы вставляются в S_1 и S_2 таким образом, чтобы максимизировать вес выравнивания F .

В случае множественного выравнивания (MSA) по аналогии с парным каждая последовательность из множества $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ дополняется гэпами до одинаковой длины: $L_{SA} = L(\bar{S}_1) = L(\bar{S}_2) = \dots = L(\bar{S}_n)$. Произвольное выравнивание SA будем рассматривать как символьную матрицу размерности $n \times L_{SA}$, где $SA[i][j] = \bar{S}_i[j]$.

Подход MAHDS

Основная идея MAHDS состоит в том, чтобы найти формальное представление абстрактного «общего предка» для всех выравниваемых последовательностей S , и построить с ним парные выравнивания каждой последовательности $S_i, i = \overline{1, n}$. Полученные парные выравнивания можно сопоставить, чтобы получить искомое MSA.

Для формального представления «общего предка» в алгоритме MAHDS мы вводим искусственную последовательность SA и позиционно-весовую матрицу PWM. Последовательность SA имеет вид $1, 2, \dots, M$, где M — длина последовательности «общего предка». Таким образом SA содержит только индексы аминокислот «общего предка», а непосредственно аминокислоты, которые находятся в соответствующих позициях изначально не известны. В свою очередь матрица PWM имеет размерность $|A| \times M$. Её строки соответствуют кодам символов исходного алфавита, а столбцы — позициям в SA . Элемент $PWM[i][j]$ несёт следующий смысл: чем больше значение данного элемента, тем больше вероятность, что в j -той позиции «общего предка» находится символ, кодируемый числом i .

Процедура преобразования PWM в MSA

Была разработана процедура f , однозначно выстраивающая MSA последовательностей S по заданной PWM.

Для этого строятся парные выравнивания $S_i, i = \overline{1, n}$ с SA , используя двухмерное динамическое программирование подобно алгоритму Нидлмана-Вунша [14], но в качестве матрицы замен используется PWM. При этом вычисляются веса выравниваний, представленные значениями функции сходства в последней строке и последнем столбце матрицы динамического программирования: $F_k = F_k(L(S_k), M)$. Для последовательности S_k :

$$F_k(i, j) = \max \begin{cases} F(i-1, j-1) + PWM(S_k[i], S_a[j]) \\ \begin{cases} F(i-1, j) - e, \text{ если } F(i-1, j) \\ \text{получен из } F(i-2, j) \end{cases} \\ \begin{cases} F(i-1, j) - d, \text{ иначе} \end{cases} \\ \begin{cases} F(i, j-1) - e, \text{ if } F(i, j-1) \\ \text{получен из } F(i, j-2) \end{cases} \\ \begin{cases} F(i, j-1) - d, \text{ иначе} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

Далее выровненные экземпляры SA будем обозначать $\overline{SA}_i, i = \overline{1, n}$. Для построения MSA мы дополняем последовательности $\overline{S}_i$ гэпами таким образом чтобы в столбцах MSA получилось M столбцов, состоящих из символов, выровненных с символами SA в парных выравниваниях (среди них могут быть и гэпы, соответствующие делециям в последовательностях S). Кроме M основных столбцов в MSA также присутствует $L_{SA} - M$ столбцов, которые соответствуют вставкам в S . Если $\overline{SA}_k[i]$ — гэп, то $\overline{S}_k[i]$ — вставка. Это значит, что необходимо создать столбец, где у всех последовательностей (кроме k -той и других, у которых присутствует вставка в этой позиции) будут гэпы.

Для полученного MSA мы определяем вес F как среднее арифметическое F_k каждого из парных выравниваний.

$$F = \frac{\sum_{k=1}^n F_k}{n} \quad (2)$$

Процедура преобразования MSA в PWM

Также была разработана обратная процедура f^{-1} , отображающая MSA в одну из таких PWM, которые при применении f привели бы к построению данной MSA. Для этого из MSA удаляются столбцы, в которых более половины символов — гэпы. Полученное сокращённое выравнивание обозначим MSA' . Каждому столбцу MSA' мы ставим в соответствие символ из $SA(1, 2, \dots, M)$, таким образом M равно количеству столбцов MSA' (если изначально известны $\overline{SA}_i, i = \overline{1, n}$, эти шаги нужно пропустить). Далее мы создаём частотную матрицу FM , которая имеет размерность $|A| \times M$. Номера её строк соответствуют кодам символов алфавита A , а номера столбцов — симво-

лам S_a . Величина элемента $FM[i][j]$ равна количеству экземпляров i -той аминокислоты в j -том столбце MSA' .

Элементы FM распределены по биномиальному закону, где количество испытаний Бернулли:

$$N = \sum_{i=1}^{|A|} \sum_{j=1}^M FM[i][j], \quad \text{а вероятность успеха:}$$

$$p[i][j] = \frac{x[i] * y[j]}{N^2}, \quad x[i] = \sum_{j=1}^M FM[i][j],$$

$$y[j] = \sum_{i=1}^{|A|} FM[i][j] \quad (\text{под успехом подразумевается веро-}$$

ятность того что символ с кодом i попадёт в j -тый столбец MSA'). Известно, что $Bin(n, p) \approx N(np, np(1-p))$, где Bin — биномиальное распределение с вышеописанными параметрами, а N — нормальное распределение с математическим ожиданием np и дисперсией $np(1-p)$. Матрицу FM' , элементы которой являются аргументами стандартного распределения $N(0, 1)$, мы получаем путём следующих преобразований FM .

$$FM'[i][j] = \frac{FM[i][j] - np[i][j]}{\sqrt{np[i][j](1-p[i][j])}} \quad (3)$$

Полученную на данном этапе матрицу FM' нельзя рассматривать как PWM, так как PWM используется в качестве матрицы замен при построении парных выравниваний. При фиксированных значениях параметров штрафа d и e , масштабирование значений в ячейках PWM приведёт к построению разных выравниваний и получению разных значений веса (меры подобия) F . Более того, даже если, масштабировать вместе с элементами PWM и параметры штрафа за разрыв, то, хотя выравнивания и будут одинаковыми, значения F будут пропорционально изменяться. Для обеспечения сравнимости этих значений мы нормализуем PWM, накладывая следующие ограничения:

$$R^2 = \sum_{i=1}^{|A|} \sum_{j=1}^M PWM[i][j]^2 \quad (4)$$

$$K_d = \sum_{i=1}^{|A|} \sum_{j=1}^M PWM[i][j] * p[i][j] \quad (5)$$

Здесь $p[i][j] = p_s[i] * p_a[j]$; $p_s[i]$ это вероятность появления символа i в S , $p_a[j]$ — вероятность появления j в SA (в данном случае $\forall j : t[j] = 1/M$). K_d это фиксированный параметр, определяющий желаемое математическое элементов PWM. R^2 — квадрат длины радиус-вектора PWM, если рассматривать её как точку в пространстве размерности $|A| * M$. R^2 ограничивает порядок величин элементов PWM. Мы не можем использовать R^2 как фиксированный параметр, так как M не яв-

ляется константой даже при фиксированных S . Вместо этого в качестве параметра вводится масштабирующий множитель R_m : $R^2 = R_m |A| M$. Способ преобразования FM для удовлетворения условий (4) и (5) представлен в статье [15]. Все PWM, использующиеся в алгоритме MAHDS, должны удовлетворять условиям (4) и (5) с заданными параметрами K_d и R_m .

Оптимизация PWM

Для того чтобы найти такую PWM, которая для данных S позволит построить MSA с наибольшим значением функции сходства F при фиксированном M мы применяем итеративную процедуру. Сначала мы генерируем множество Q случайных максимально удалённых друг от друга (по Евклидовому расстоянию) матриц размерности $|A| \times M$. По умолчанию $|Q| = 400$. Это стартовые точки для дальнейшей оптимизации. Матрицы вошедшие в Q нормализуются, чтобы удовлетворять условиям (4) и (5), после чего интерпретируются как PWM.

Далее для каждой PWM из множества Q применяется процедура f : строятся парные выравнивания и оценивается F . По полученным парным выравниваниям восстанавливается PWM (процедура f^{-1}), которая не является идентичной предыдущей (она в большей степени подстроена под множество S). Такие преобразования выполняются итеративно до тех пор, пока значение F возрастает (то есть выполняется оптимизация PWM, при которой целевой функцией является функция сходства). Среди оптимизированных матриц из множества Q выбирается PWM с наибольшим значением F . Эта PWM с помощью процедуры f позволяет построить наилучшее MSA при данном фиксированном значении M .

Оценка статистической значимости

При построении MSA изначально неизвестно, какая длина S_a (значение M) является оптимальной. Величина F зависит от количества столбцов выравнивания и поэтому не может использоваться для корректного сравнения качества MSA, полученных при разных значениях M . В таких случаях показательной является статистическая значимость Z , которая является мерой неслучайности выравнивания [16].

Для оценивания Z выравнивания, полученного с помощью заданной PWM, используется метод Монте-Карло. В ходе оценивания генерируется R_n (по умолчанию $R_n = 100$) множеств случайных последовательностей. Они получаются путём перемешивания символов в рамках отдельных последовательностей из S . Для каждого из сгенерированных множеств подсчитывается F по формулам (1) и (2) с использованием заданной PWM. Для подсчёта Z используется формула $Z = \frac{F - \tilde{m}}{\tilde{\sigma}}$, где $\tilde{m}$ —

оценка математического ожидания F , $\tilde{\sigma}$ — оценка среднеквадратичного отклонения F . Значение Z , большее, чем пороговое Z_t , свидетельствует о том, что выравнивание, полученное с помощью данной PWM, является статистически значимым. Z_t определяется по правилу 3 сигма при выравнивании случайных последовательностей [12].

Для выбора наиболее подходящего M мы перебираем варианты близкие к средней длине последовательностей S . Множество предполагаемых значений M обозначим M_s . Оно может быть задано, например, так: $M_s = \{M | (\bar{l} - \Delta \leq M \leq \bar{l} + \Delta) \& (M \bmod s = 0)\}$, где $\bar{l}$ — средняя длина последовательности в S , Δ — параметр, определяющий нижнюю и верхнюю грани, s — шаг. Для каждого значения M из M_{set} при помощи итеративной процедуры находится PWM, обеспечивающая наибольшее F и оценивается Z . При помощи PWM, обеспечившей наибольшее Z , строится итоговое MSA.

Кроме непосредственно построения MSA, наш подход позволяет также оценивать статистическую значимость произвольных MSA вне зависимости от метода, которым они были получены. Для этого достаточно выполнить процедуру f^{-1} и оценить значение Z для PWM данного MSA.

Модификации MAHDS

В реальных биологических последовательностях скоррелированные мутации сразу в нескольких соседних позициях происходят чаще чем одиночные мутации. Мы разработали модификацию MAHDS, в которой учитываются корреляции символов, что позволяет находить более корректные MSA в некоторых случаях [11]. В этой вариации MAHDS вместо одиночных символов мы работаем с упорядоченными парами символов, и PWM в таком случае имеет размерность $|A|^2 \times (M - 1)$. Все шаги алгоритма при этом остаются прежними. Количество элементов PWM при большом значении $|A|$ существенно возрастает, что делает итеративную процедуру оптимизации PWM не эффективной из-за разреженности частотных матриц FM . Особенно это актуально для аминокислотных последовательностей, для которых $|A| = 20$. Решением может быть сужение исходного алфавита до 5 символов, обозначающих химические свойства аминокислот: неполярные, полярные незаряженные, ароматические, заряженные отрицательно, заряженные положительно. При таком подходе теряется часть информации о последовательностях, однако появляется возможность учитывать корреляции.

Также можно модифицировать процедуру оценки Z по методу Монте-Карло. При выравнивании множеств случайных последовательностей с использованием за-

данной PWM может применяться итеративная процедура, подстраивающая PWM под эти последовательности. Это увеличивает объём вычислений, однако позволяет получать более стабильные и воспроизводимые результаты. Величина Z_t в таком случае становится меньше. Оценку Z с итеративной оптимизацией PWM мы ранее применяли в [12,13] и применяем в данной работе.

Результаты и обсуждение

Мы сгенерировали 100 множеств по 100 случайных последовательностей. Множества состоят из 40 последовательностей по 60 символов, 10 по 90, 10 по 110, 40 по 140 ($\bar{l} = 100$). Символы появляются в последовательностях с вероятностями характерными для белков живых организмов в среднем [17]. Мы построили выравнивание каждого из множеств и оценили статистическую значимость этих выравниваний, чтобы определить пороговое значение Z_t , корректное при выравнивании аминокислотных последовательностей с учётом корреляций. Гистограмма плотности распределения величины Z для MSA модельных последовательностей представлена ниже (см. рис. 1).

Полученное эмпирическое распределение близко к $N(1.19, 2.76)$. По критерию согласия Колмогорова-Смирнова величина $p = 0.47$ (критерий имеет правостороннюю критическую область). Также по рисунку 1 видно, что ни для одного множества последовательностей оцененная статистическая значимость MSA не превысила $m + 3\sigma$, значит мы действительно можем применять Z_t рассчитанную по правилу 3 сигма: $Z_t = 6.17$.

Если при оценке статистической значимости PWM по методу Монте-Карло выравниваний не оптимизировать PWM под множества случайным образом перемешанных последовательностей, получится гистограмма следующего вида.

При сравнении данного распределения с $N(29.03, 24.3)$ по критерию согласия Колмогорова-Смирнова величина $p = 0.39$, что свидетельствует о меньшей схожести данного распределения с нормальным, чем на рисунке 1. При этом для обобщённого распределения экстремальных значений величина $p = 0.65$. Все значения также как и на предыдущем рисунке не превышают $m + 3\sigma$, поэтому можно считать $Z_t = 43.82$.

Для выравнивания одного случайно взятого множества модельных последовательностей мы построили график изменения значений F в ходе оптимизации итеративной процедурой каждой из 400 инициализирующих матриц.

Как видно на рисунке 3, наибольшие значения F достигаются не менее чем через 10 итераций. При этом итеративная процедура достигает локального максимума в среднем за 7.91 итерацию. Поэтому величина $|Q|$ действительно должна быть достаточно большой (не менее 400), чтобы среди инициализирующих матриц нашлись те, которые могут достичь высоких значений F . В среднем разница между F на первой и последней итерациях составляет 84.84. Сильное возрастание F на второй итерации, вероятнее всего, связано с тем, что после первой итерации PWM создаётся из частотной матрицы

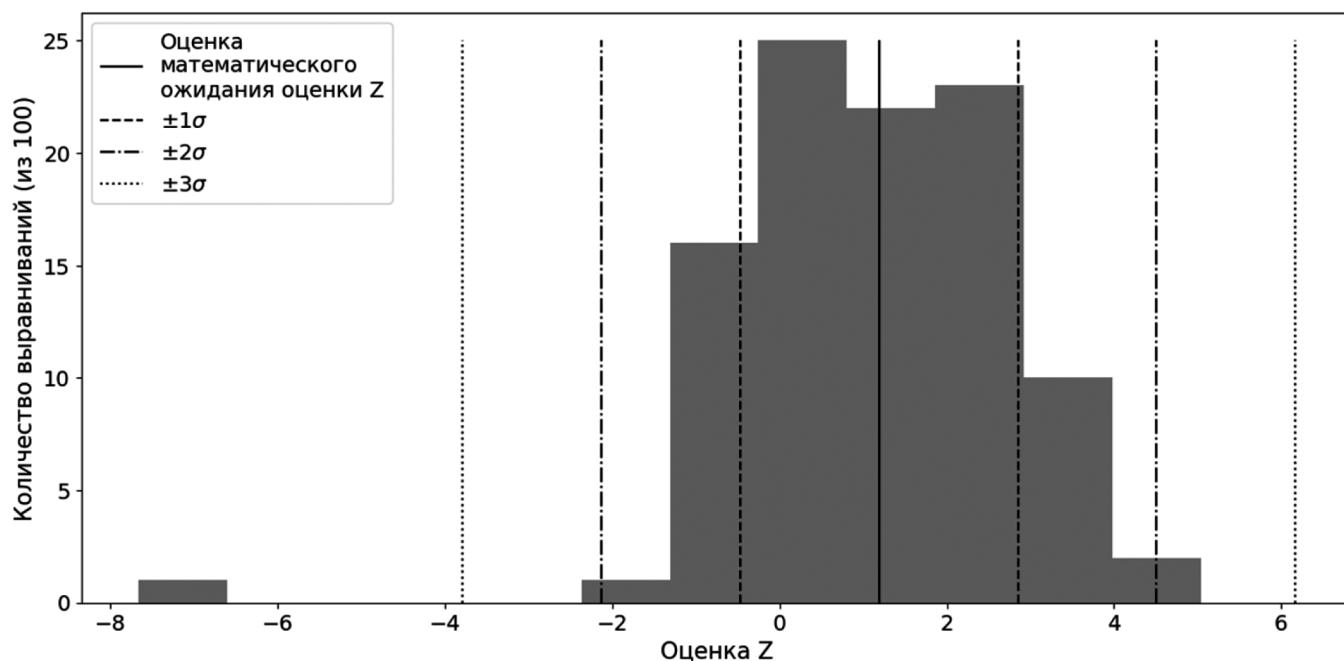


Рис. 1. Эмпирическая плотность распределения величины Z для MSA случайных аминокислотных последовательностей

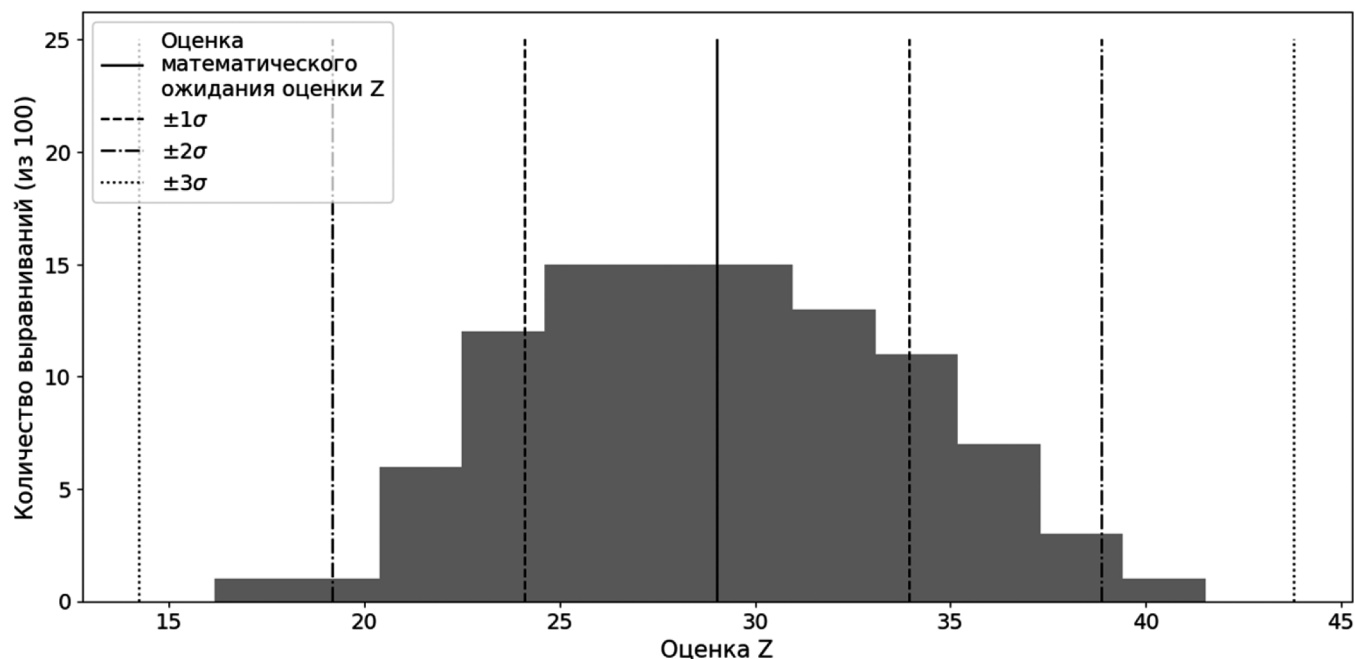


Рис. 2. Эмпирическая плотность распределения величины Z для MSA случайных аминокислотных последовательностей (без оптимизации PWM при оценивании Z)

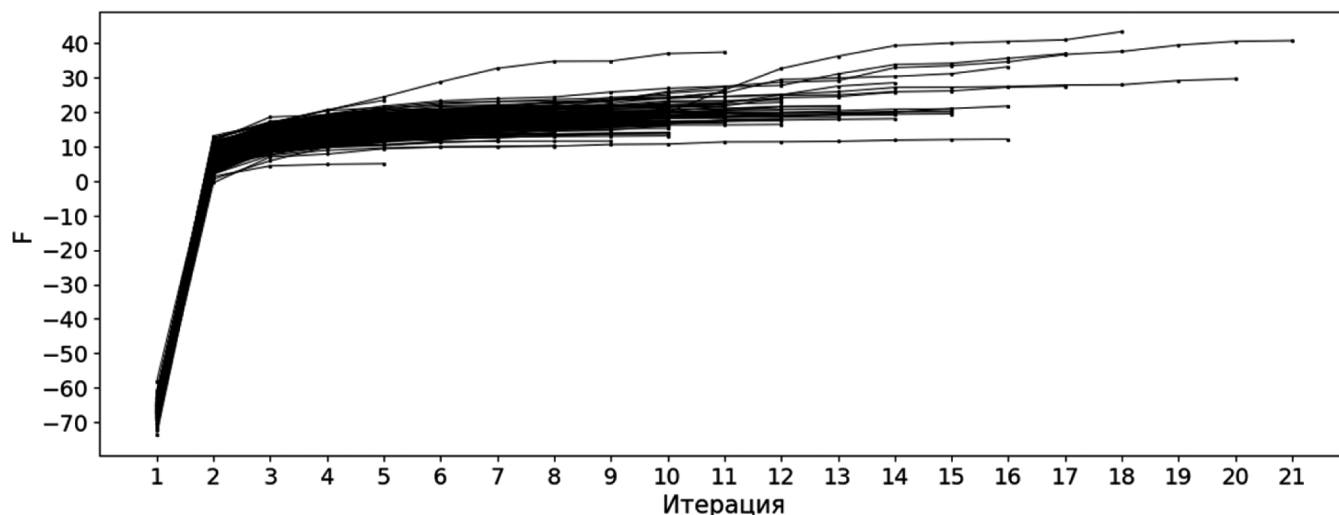


Рис. 3. Зависимость значений функции подобию F от номера итерации при оптимизации каждой из 400 случайных матриц

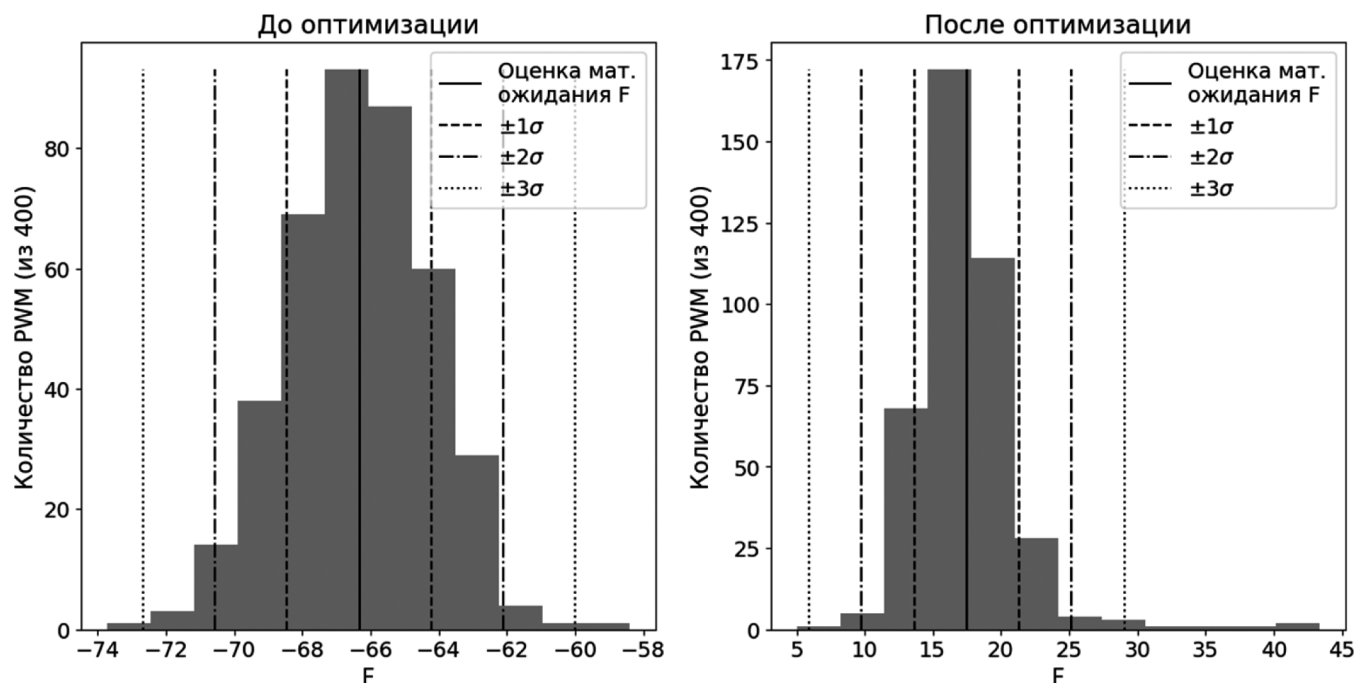
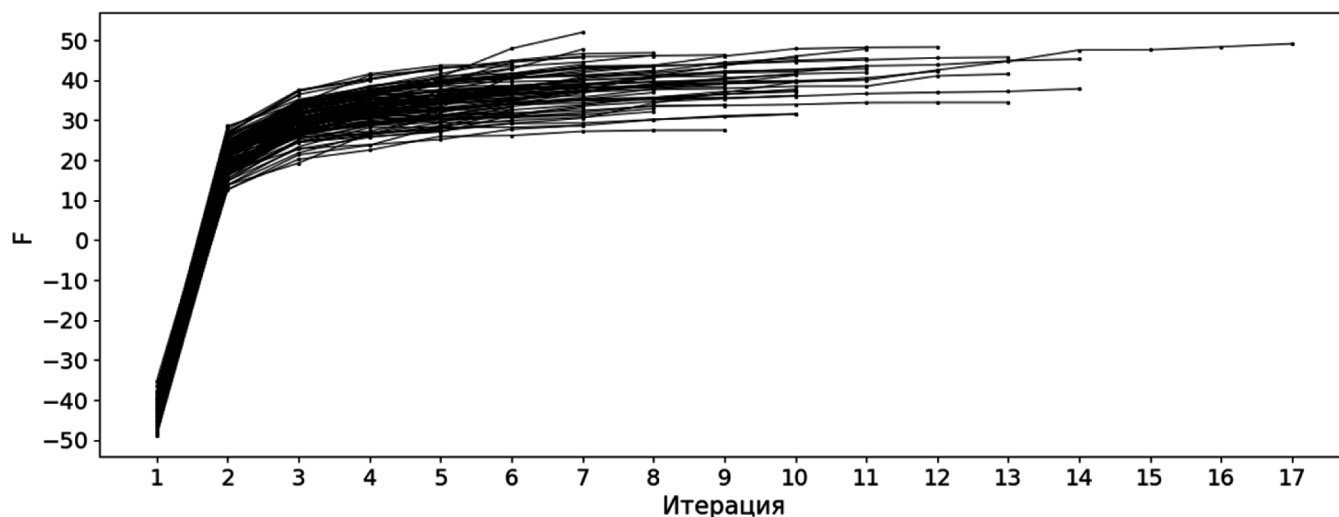
выравнивания, а не из нормализованной случайной матрицы. Также мы построили гистограммы распределения F для матриц множества Q до оптимизации и после.

Изначально близкое к $N(-66.34, 4.45)$ распределение (по критерию согласия Колмогорова-Смирнова значение $p=0.47$) после оптимизации преобразуется в иное распределение, не являющееся нормальным или обобщённым распределением экстремальных значений (значение $p \leq 0.0001$). Наличие на гистограмме справа значений F , существенно превышающих математическое ожидание, свидетельствует о том, что некоторые PWM были хорошо оптимизированы под выравнивае-

мые последовательности и их применение позволит построить значимое MSA.

Для выравнивания того же самого множества последовательностей мы построили график изменения значений F в ходе подстройки итеративной процедурой PWM под каждое из 100 множеств последовательностей со случайно перемешанными символами при оценивании статистической значимости выравнивания по методу Монте-Карло.

В данном случае итеративная процедура достигает локального максимума в среднем за 7.39 итераций. При этом средняя разница между величинами F на пер-

Рис. 4. Гистограммы распределения значений F до и после применения итеративной процедурыРис. 5. Зависимость значений функции подобию F от номера итерации при оптимизации PWM под перемешанные последовательности в ходе оценки Z

вой и последней итерациях составляет 70.42, что существенно меньше, чем в ходе поиска оптимальной PWM для выравнивания S . Однако на первой итерации на рисунке 5 в сравнении с рисунком 3 величины F в среднем больше, так как при оценке статистической значимости изначально PWM хоть и не адаптирована под случайные последовательности, но по крайней мере отражает их аминокислотный состав.

Также мы построили гистограммы распределения F для выравнивания случайно перемешанных последовательностей с помощью заданной PWM до её оптимизации и после.

В данном случае, в отличие от рисунка 4, вид распределения не меняется существенно. До оптимизации эмпирическое распределение близко к $N(-42.49, 8.29)$ (по критерию согласия Колмогорова-Смирнова значение $p=0.54$), после оптимизации — к $N(38.03, 29.48)$ (по критерию согласия Колмогорова-Смирнова значение $p=0.79$). Для корректной оценки Z необходимо, чтобы F было распределено по нормальному закону. Подстройка PWM позволяет получить распределение более близкое к нормальному, поэтому применение итерационной процедуры на этапе оценки Z желательно.

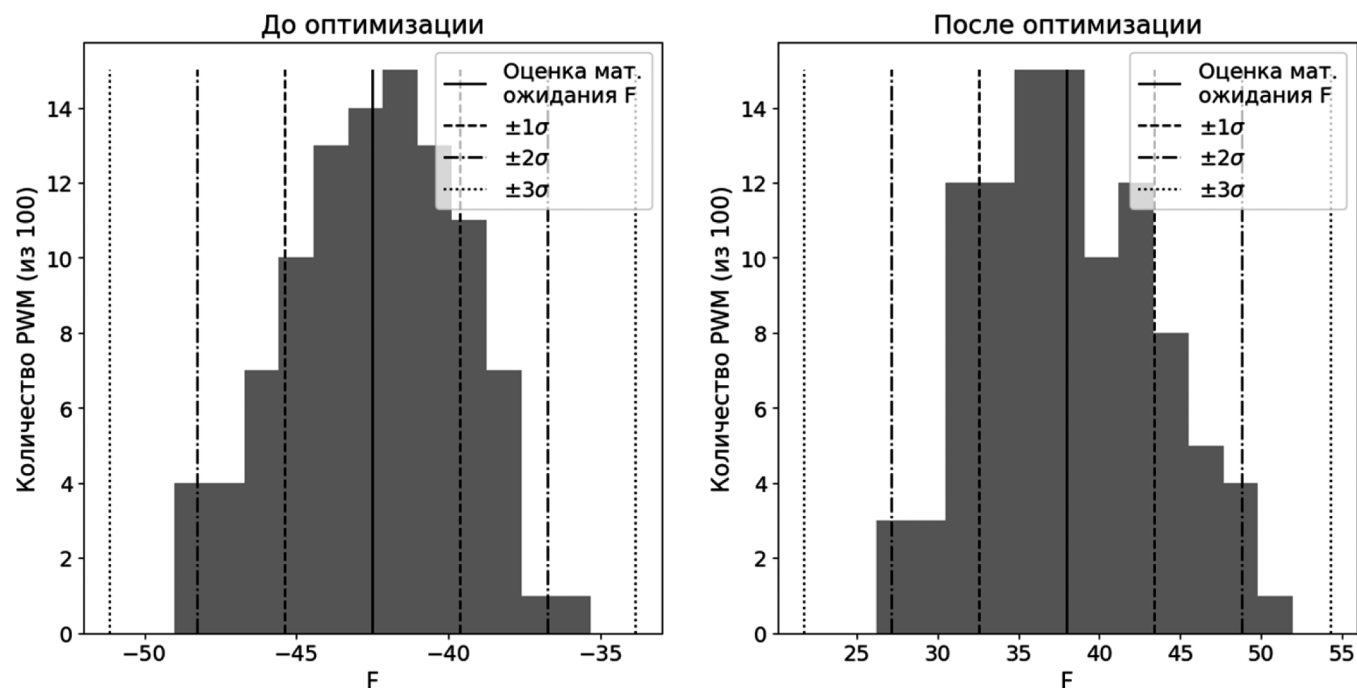


Рис. 6. Гистограммы распределения значений F до и после применения итеративной процедуры в ходе оценивания статистической значимости PWM

Заключение

Были исследованы свойства MAHDS, проявляющиеся при построении и оценивании выравниваний аминокислотных последовательностей с учётом корреляций соседних символов. В этом контексте для оптимизации PWM итеративной процедурой необходимо использовать упрощённый алфавит (вместо 20 аминокислот символы соответствуют 5 классам аминокислот по их химическим свойствам). Были рассчитаны пороговые

величины значимости. Если при оценке значимости по методу Монте-Карло PWM не оптимизируется, MSA может считаться отличным от случайного при $Z > 43.82$. Если PWM с помощью итеративной процедуры подстраивается под множества последовательностей со случайно перемешанными символами при оценке значимости, отличное от случайного выравнивание должно иметь $Z > 6.17$. Точность и воспроизводимость оценки во втором случае лучше, однако такой подход требует затраты дополнительных вычислительных ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chatzou M. et al. Multiple sequence alignment modeling: methods and applications // Briefings in Bioinformatics. 2016. Vol. 17, № 6. P. 1009–1023.
2. Wang L., Jiang T. On the complexity of multiple sequence alignment.: 4 // J Comput Biol. United States, 1994. Vol. 1, № 4. P. 337–348.
3. Gotoh O. Heuristic Alignment Methods // Multiple Sequence Alignment Methods / ed. Russell D.J. Totowa, NJ: Humana Press, 2014. P. 29–43.
4. Chowdhury B., Garai G. A review on multiple sequence alignment from the perspective of genetic algorithm // Genomics. 2017. Vol. 109, № 5. P. 419–431.
5. Feng D.F., Doolittle R.F. Progressive sequence alignment as a prerequisite to correct phylogenetic trees // J Mol Evol. 1987. Vol. 25, № 4. P. 351–360.
6. Edgar R.C. MUSCLE: multiple sequence alignment with high accuracy and high throughput // Nucleic Acids Res. 2004. Vol. 32, № 5. P. 1792–1797.
7. Notredame C., Higgins D.G., Heringa J. T-coffee: A novel method for fast and accurate multiple sequence alignment: 1 // Journal of Molecular Biology. 2000. Vol. 302, № 1. P. 205–217.
8. Higgins D.G., Sharp P.M. CLUSTAL: a package for performing multiple sequence alignment on a microcomputer // Gene. 1988. Vol. 73, № 1. P. 237–244.
9. Lassmann T., Sonnhammer E.L. Kalign — an accurate and fast multiple sequence alignment algorithm // BMC Bioinformatics. 2005. Vol. 6, № 1. P. 298.
10. Katoh K. et al. MAFFT: a novel method for rapid multiple sequence alignment based on fast Fourier transform // Nucleic Acids Res. 2002. Vol. 30, № 14. P. 3059–3066.
11. Korotkov E.V. et al. Multiple Alignment of Promoter Sequences from the Arabidopsis thaliana L. Genome: 2 // Genes. 2021. Vol. 12, № 2. P. 135.
12. Korotkov E.V., Kostenko D.O. Application of the MAHDS Method for Multiple Alignment of Highly Diverged Amino Acid Sequences: 7 // International Journal of Molecular Sciences. 2022. Vol. 23, № 7.
13. Kostenko D., Korotkova M., Korotkov E. Multiple Alignments of Protein Families with Weak Sequence Similarity Within the Family // Symmetry. 2025. Vol. 17, № 3.
14. Needleman S.B., Wunsch C.D. A general method applicable to the search for similarities in the amino acid sequence of two proteins: 3 // Journal of Molecular Biology. Academic Press, 1970. Vol. 48, № 3. P. 443–453.
15. Pugacheva V., Korotkov A., Korotkov E. Search of latent periodicity in amino acid sequences by means of genetic algorithm and dynamic programming: 5 // Statistical Applications in Genetics and Molecular Biology. 2016. Vol. 15, № 5.
16. Comet J.P. et al. Significance of Z-value statistics of Smith-Waterman scores for protein alignments: 3–4 // Comput Chem. 1999. Vol. 23, № 3–4. P. 317–331.
17. Kozlowski L.P. Proteome-pl: proteome isoelectric point database // Nucleic Acids Research. 2016. Vol. 45, № D1. P. D1112–D1116.

© Костенко Дмитрий Олегович (dk0stenko@yandex.ru); Коротков Евгений Вадимович (bioinf@yandex.ru);

Короткова Мария Александровна (discretmath@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

FEATURES OF AUTOMATION OF BIOTECHNOLOGICAL PROCESSES IN THE FOOD INDUSTRY

**S. Kurovsky
D. Mishin
E. Yatsenko**

Summary. This article reveals the features of automation of biotechnological processes in industrial production — on the example of the food industry (segment of cheese production). The issues reflected in the article are particularly relevant in the context of the need to form and systematically integrate automated platforms and control systems for production and technological processes to increase the quality of the final product, services provided, the efficiency of dispatching tasks for managing biotechnological processes in the manufacture of food products (including cheese products). The purpose of the scientific study is to identify the features and approaches to the automation and management of biotechnological processes in industrial production (on the example of the food industry). To achieve this goal, the article provides a classification of devices required for the automation of biotechnological processes in the food industry, outlines a conceptual model for the formation of promising automated control systems for biotechnological processes, and determines the impact of automation of cheese production processes on the cost.

Keywords: automation, process control, industrial production, food industry, cheese products, cost price, control concept, automated system devices.

Куровский Станислав Валерьевич

Руководитель научно-исследовательского подразделения, ООО «Высшая Школа Образования»
8917564@gmail.com

Мишин Денис Александрович

Руководитель редакционно-издательского отдела, ООО «Высшая Школа Образования»
9651530@gmail.com

Яценко Елена Олеговна

Аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)», Москва
YatsenkoEO@yandex.ru

Аннотация. В данной статье раскрываются особенности автоматизации биотехнологических процессов в промышленном производстве — на примере пищевой промышленности (сегмента изготовления сырной продукции). Отражаемые в статье вопросы приобретают особую актуальность в условиях необходимости формирования и планомерной интеграции автоматизированных платформ и систем управления производственно-технологическими процессами для увеличения степени качества конечной продукции, предоставляемых услуг, эффективности диспетчеризации задач управления биотехнологическими процессами при изготовлении пищевой продукции (в том числе сырной продукции). Цель научного исследования состоит в выявлении особенностей и подходов к автоматизации и управлению биотехнологическими процессами в промышленном производстве (на примере пищевой промышленности). Для достижения поставленной цели в статье приведены классификация устройств, необходимых при автоматизации биотехнологических процессов в пищевой промышленности, обозначена концептуальная модель формирования перспективных автоматизированных систем управления биотехнологическими процессами, а также определено влияние автоматизации технологических процессов производства сыра на себестоимость.

Ключевые слова: автоматизация, управление технологическими процессами, промышленное производство, пищевая промышленность, сырная продукция, себестоимость, концепция управления, устройства автоматизированной системы.

Введение

Для обеспечения в РФ продовольственной безопасности необходимо пищевым предприятиям предпринимать меры, ориентированные на увеличение результативности производственных процессов [1]. В целях достижения стремительного прогресса в поднимаемом вопросе целесообразно интегрировать современные автоматизированные, интеллектуальные системы и производственные линии [8–10]. Максимальный финансовый результат отмечается в случае ком-

плексной технологии автоматизации в управлении биотехнологическими процессами.

Помимо достаточно высоких финансовых результатов, следует отметить и технологическую эффективность автоматизированных линий и платформ на основе оптимизации издержек, сокращения производственных потерь. Ключевое достоинство интеллектуальных систем — возможность оперативного мониторинга и управления биотехнологическими процессами. Получаемые информационные данные могут стать базой

прогнозирования роста факторов влияния на пищевую промышленность [2], [6].

Планируется сформировать многообразие биотехнологических платформ для перспективной автоматизации выпуска продовольственных продуктов (более 50 % в течение 2025–2030 гг.) [5]. Для того чтобы достичь указанного результата, необходимо оптимизировать выполнение биотехнологических процессов путём увеличения их результативности. Практическое осуществление подобных мер определяет повышение нормативных требований и положений к автоматизирующим технологиям. Это также предполагает увеличение степени результативности имеющихся автоматизированных систем за счёт практического применения способов интеллектуализации решаемых производственных задач посредством формирования и интеграции автоматизированных систем управления биотехнологическими процессами в пищевой промышленности.

В современных условиях существуют разные аппаратные комплексы и автоматизирующие технологии для пищевой промышленности. Достаточно перспективными из них считаются микропроцессорные средства, требования их использования включают: широкий перечень модулей выходной и входной информации, управляющих панелей, модулей информационных взаимодействий, питания, обеспечения отказоустойчивости, в том числе резервирования данных с автоматизированных производственных линий, высокая степень понятности и доступности, компактность размеров, информационная поддержка в ходе практического применения микропроцессорных средств [3], [4].

Цель работы — выявление особенностей и подходов к автоматизации и управлению биотехнологическими процессами в промышленном производстве (на примере пищевой промышленности).

Для достижения поставленной цели в статье необходимо решить следующие задачи:

1. Представить классификацию устройств, необходимых при автоматизации биотехнологических процессов в пищевой промышленности.
2. Обозначить концептуальную модель формирования перспективных автоматизированных систем управления биотехнологическими процессами.
3. Определить влияние автоматизации технологических процессов производства сыра на себестоимость.

Новизна данного научного исследования состоит в двух положениях:

- 1) построении концептуальной модели формирования перспективных автоматизированных систем управления биотехнологическими процессами

на основе принципов системного подхода в целях устранения актуальных проблем, существующих в управлении биотехнологическими процессами;

- 2) определении влияния автоматизации технологических процессов производства сыра на себестоимость при внедрении инновационного оборудования (автоматизированной производственной линии).

Материалы и методы

Авторами статьи для определения классификации аппаратных и прикладных устройств, необходимых при автоматизации биотехнологических процессов в пищевой промышленности использовались методы анализа теоретических и эмпирических источников академической литературы, индукции, дедукции, сопоставления, систематизации, системный подход, метод концептуализации данных, обобщения.

Для создания концептуальной модели формирования перспективных автоматизированных систем управления биотехнологическими процессами, а также выявления влияния автоматизации технологических процессов производства сыра на себестоимость был осуществлен ретроспективный, факторный, статистический, сопоставительный анализ, анализ документов, отражающих влияние текущих факторов развития национальной экономики на производственные процессы пищевой промышленности.

Классификация устройств, необходимых при автоматизации биотехнологических процессов в пищевой промышленности

На основе результатов анализа теоретических и эмпирических источников научно-методической литературы [2–10] авторами была составлена классификация устройств, необходимых при автоматизации биотехнологических процессов в пищевой промышленности (рисунк 1).

Тем не менее, на фоне изменений, произошедших в социально-экономическом состоянии РФ, способствовавших возникновению дополнительных макроэкономических и геополитических рисков национальной безопасности [7], значимым аспектом выступает комплексное обеспечение биотехнологических процессов в пищевой промышленности посредством инновационного оборудования, которое должно быть оснащено автоматизирующими технологиями, изготовленными при помощи российских запасных частей и комплектующих.

В процессе выбора автоматизирующих устройств для оптимизации биотехнологических процессов в пищевой промышленности необходимо уделить особое внима-



Рис. 1. Классификация устройств, необходимых при автоматизации биотехнологических процессов в пищевой промышленности (источник: разработано авторами)

ние функциональному предназначению потенциально автоматизированного комплекса. Ключевое различие между программируемыми реле и контроллерами — скорость практического осуществления запрограммированных операций и объём памяти. По сравнению с комплексной автоматизирующей системой действие реле и контроллеров ограничивается достаточно низким объёмом памяти и несущественным числом портов для выхода и входа информации.

Концептуальная модель формирования перспективных автоматизированных систем управления биотехнологическими процессами

Актуальные проблемы в сфере управления биотехнологическими процессами способствовали созданию концептуальной модели формирования перспективных автоматизированных систем управления биотехнологическими процессами на основе принципов системного подхода:

- построение иерархической управленческой структуры биотехнологических процессов с учётом интеграции интеллектуальной системы;

- формирование интегрированной интеллектуальной системы управления биотехнологическими процессами;
- осуществление функциональной интеграции этапов ферментации и стерилизации изготавливаемой продукции на базе координации режимов охлаждения, нагревания, выдержки пищевой продукции в определенных питательных средах;
- практическое использование аналитического инструментария смешанных автоматизированных систем (объединение интервальных и робастных систем), а также способов интеллектуального управления биотехнологическими процессами при помощи нейросетевых технологий, имитационного моделирования;
- минимизация трудностей при интеграции и практическом использовании интеллектуального комплекса в пищевой промышленности, в частности, выбор упрощенной автоматизированной системы, содержащей минимальный алгоритм управления биотехнологическими процессами на основе нейросетевых технологий с минимальным количеством нейронов, или практическое осуществле-

ние автоматизированной схемы управления биотехнологическими процессами на базе изменений параметров регулирующего эффекта, лежащего в основе замкнутой автоматизированной схемы управления биотехнологическими процессами;

— формирование открытой автоматизированной схемы управления биотехнологическими процессами в пищевой промышленности, исходя из интеллектуализации рабочих задач обработки огромных информационных массивов.

Представленные принципы системного подхода могут осуществляться в ходе формирования алгоритмов управления биотехнологическими процессами в пищевой промышленности, встраиваемых в интеллектуальный комплекс, а также принятия управленческих значимых решений по входным данным биотехнологических процессов.

Влияние автоматизации технологических процессов производства сыра на себестоимость

В настоящее время одна из ключевых проблем производства сырной продукции — ручная распрессовка сырной продукции в разрезе её видов. Её нужно делать достаточно быстро: в течение минуты в среднем сыр должен быть извлечен из 3 пресс-форм. Если операции распрессовки сырной продукции выполнялись с отставанием от указанного выше норматива, то увеличивается кислотность в составе сырной продукции, снижается степень её качества, затрудняется выполнение операций ручной распрессовки. Соответственно, существует достаточно высокая степень вероятности производственного брака при выпуске сырной продукции.

В контексте данного научного исследования предлагается интеграция инновационного оборудования (производственной автоматизированной линии), способствующего автоматическому выполнению операций распрессовки сырной продукции (таблица 1).

Таблица 1.

Базовые технические характеристики производственной автоматизированной линии, предлагаемой к интеграции в пищевой промышленности

Техническая характеристика	Содержание
Уровень производительности, количество форм за 1 час	600
Длительность операционного цикла, секунд	6
Количество форм в течение 1 минуты, ед.	6
Энергетическая мощность, кВт	1,1
Электрическое напряжение, Ватт	220
Расход сжатого воздуха, куб. метров за 1 час	180
Рыночная стоимость производственной автоматизированной линии, не учитывая НДС, млн. руб.	5,5

Источник: разработано авторами.

Этапы производственно-технологического процесса при использовании производственной автоматизированной линии:

- установка оператором производственной автоматизированной линии пресс-форм на конвейерную ленту, она движется в сторону извлечения крышки с пресс-формы;
- механическое удаление с пресс-формы крышки;
- передача пресс-формы в блок её переворачивания под углом 180 градусов;
- перемещение сырной продукции к блоку распрессовки (необходим сжатый воздух);
- перемещение сырной продукции к блоку приёма, лоток с сырной продукцией автоматически подаётся в соляный блок;
- пресс-форма, которая была удалена, при помощи конвейерной ленты попадает в блок мойки.

Таблица 2.

Сопоставительный анализ процесса распрессовки сырной продукции до и после интеграции производственной автоматизированной линии.

Статья издержек	До интеграции производственной автоматизированной линии	После интеграции производственной автоматизированной линии	Абсолютное изменение
Ежемесячный объем издержек, тыс. руб., в том числе:	26290,4	26340,5	50,1
Расходы на эксплуатацию и содержание производственного оборудования, тыс. руб.	415,9	417,8	1,9
Расходы на энергетические и топливные ресурсы, тыс. руб.	1248,5	1249,8	1,3
Расходы на моющие средства, тыс. руб.	327,2	328,8	1,6
Общезаводские расходы по цеху, включая амортизационные отчисления, тыс. руб.	2350,0	2395,4	45,4

Источник: разработано авторами.

Сразу после интеграции производственной автоматизированной линии в общий рабочий процесс АО «Тульский молочный комбинат» общий объём затрат увеличится на 0,1 %, что подтверждается данными в таблице 2.

Интеграция инновационного оборудования окажет воздействие на величину себестоимости выпуска сырной продукции, что обозначено на рисунке 2.

Полученные результаты также показывают, что сразу после интеграции инновационного оборудования в управление биотехнологическими процессами общий объём затрат увеличится на 0,1 %. Данная величина не является существенной для рассматриваемого предприятия пищевой промышленности.

Несущественное повышение издержек в начале интеграции инновационного оборудования в перспективе будет компенсировано за счёт увеличения масштабов выпуска сырной продукции, интеллектуализации труда, сокращения трудозатрат.

Выводы

В рамках данного исследования была представлена классификация устройств, необходимых при автоматизации биотехнологических процессов в пищевой промышленности.

Обозначена концептуальная модель формирования перспективных автоматизированных систем управления биотехнологическими процессами, основанная на принципах системного подхода в целях устранения актуальных проблем, существующих в управлении биотехнологическими процессами.

Представленные принципы системного подхода могут осуществляться в ходе формирования алгоритмов управления биотехнологическими процессами в пищевой промышленности, встраиваемых в интеллектуальный комплекс, а также принятия управленческих значимых решений по входным данным биотехнологических процессов.

Определено влияние автоматизации технологических процессов производства сыра на себестоимость при внедрении инновационного оборудования (автоматизированной производственной линии): несущественное повышение издержек в начале интеграции инновационного оборудования, которое в перспективе будет компенсировано за счёт увеличения масштабов выпуска сырной продукции, интеллектуализации труда, сокращения трудозатрат.

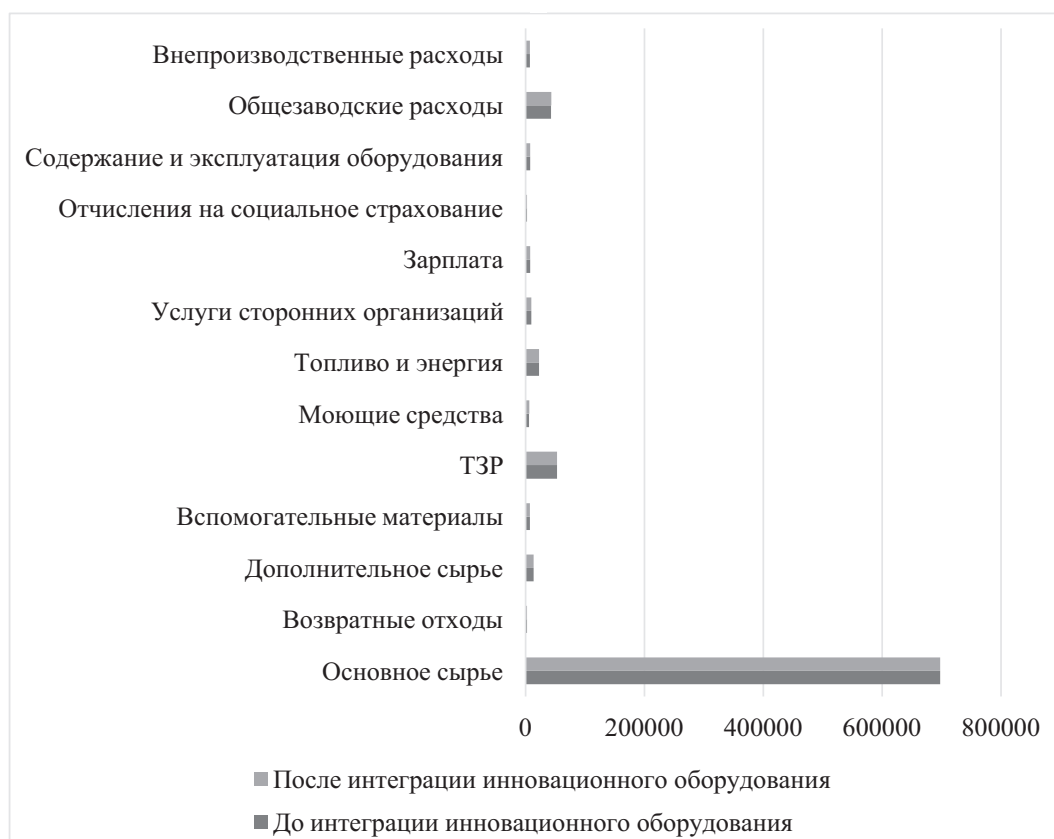


Рис. 2. Сопоставительный анализ калькуляции себестоимости сырной продукции до и после интеграции производственной автоматизированной линии (источник: разработано авторами)

ЛИТЕРАТУРА

1. Указ Президента РФ от 21.01.2020 N 20 (ред. от 10.03.2025) «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_343386/ (дата обращения: 29.03.2025).
2. Борисевский А.М., Каргин В.А., Мокрушин С.А., Сохинов Д.Ю. Перспективы использования роботизированной системы для сортировки фруктов // Роговские чтения: сборник докладов научно-практической конференции с международным участием, Москва, 16 декабря 2022 года. — Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2023 — С. 133–138.
3. Каргин В.А., Кишко В.В., Усанов К.М., Сохинов Д.Ю. Результаты создания интеллектуальной системы с использованием нейросетевых технологий для оценки качества яблок при сортировке // Вавиловские чтения — 2022: Сборник статей Международной научно-практической конференции, посвященной 135-й годовщине со дня рождения академика Н.И. Вавилова, Саратов, 22–25 ноября 2022 года. — Саратов: Общество с ограниченной ответственностью «Амирит», 2022 — С. 710–715.
4. Каргин В.А., Кишко В.В., Борисевский А.М. Перспективы использования алгоритмов искусственного интеллекта для раннего обнаружения заболеваний сырья растительного происхождения // В сборнике: Фабрика будущего: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности. Сборник научных докладов III Международной специализированной конференции — выставки. — Курск, 2022. — С. 142–148.
5. Кошкина Л.Ю., Понкратов А.С., Понкратова С.А. Инжиниринг биотехнологических процессов и систем. — Казань: КНИТУ, 2019. — 104 с.
6. Музыка М.Ю., Благовещенский И.Г., Благовещенский В.Г., Головин В.В., Благовещенская М.М., Качура И.А. Технические решения для реализации программно-аппаратного комплекса управления качеством пищевой продукции // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. — 2021. — Т. 83. — №. 4 (90). — С. 49–56.
7. Самигулина З.И., Курмашева А.К., Казбек М.К. Разработка системы автоматизации процессом отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха для пищевой промышленности на оборудовании фирмы HONEYWELL // Вестник Казахстанско-Британского технического университета. — 2024. — Т. 21. — №. 1. — С. 28–41.
8. Харисов Р.А. Совершенствование технологии изоляции трубопроводов полимерными ленточными покрытиями с двусторонним липким слоем: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19. — УГНТУ, Уфа, 2011. — 246 с.
9. Харисов Р.А. Совершенствование технологии изоляции трубопроводов полимерными ленточными покрытиями с двусторонним липким слоем: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19: защищена 29.06.2011: утв. 27.11.2011 / Харисов Рустам Ахматнурович. — Уфа: УГНТУ, 2011. — 23 с.
10. Харисов Р.А. Усовершенствование метода оценки трещиностойкости металла труб // НИС «Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. — М.: ОБРАКАДЕМНАУКА, 2013. — Вып. 2. — С. 8–10.

© Куровский Станислав Валерьевич (8917564@gmail.com); Мишин Денис Александрович (9651530@gmail.com);

Яценко Елена Олеговна (YatsenkoEO@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ И БАЛАНСИРОВКИ НАГРУЗКИ ДЛЯ API-СЕРВИСОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

CONCEPT OF INTELLIGENT CONTROL AND LOAD BALANCING SYSTEM FOR ARTIFICIAL INTELLIGENCE API SERVICES

**P. Matsipudra
V. Shmakov**

Summary. This article presents an innovative middleware software concept designed for centralized management of access to artificial intelligence API services under modern geopolitical restrictions and challenges. The paper thoroughly examines complex issues, encompassing both the significant lack of effective tools for managing multiple API keys and the critical need to ensure reliable uninterrupted access to international AI services for organizations located in regions with limited access to global technological resources. As a solution, a multi-component system is proposed, organically combining advanced load balancing mechanisms with innovative methods of bypassing regional restrictions through specialized servers located in countries with open access. The developed solution includes comprehensive components for monitoring, control, and multi-level security assurance. The study conducts a comprehensive comparative analysis of existing market analogues, identifies their significant limitations in the context of solving the problem of geopolitical accessibility, and presents a convincing justification for the need to develop a qualitatively new solution. The technical implementation of key system components is described in detail, utilizing modern technologies and approaches to developing enterprise-grade fault-tolerant software. The obtained research results demonstrate the high effectiveness of the proposed solution in ensuring stable access to AI services and optimizing their use in organizations of various scales, regardless of their geographical location and current geopolitical situation.

Keywords: API management, middleware, artificial intelligence, enterprise security, scalability, geopolitical restrictions, centralized management, load balancing, cost optimization, fault tolerance, proxy server, API security, LLM services, API access management, OpenAI API, Claude API.

Маципудра Петр Евгеньевич

Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
matsipudra.pe@edu.spbstu.ru

Шмаков Владимир Эдуардович

к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
shmakov_ve@spbstu.ru

Аннотация. В данной статье представлена инновационная концепция программного обеспечения промежуточного уровня, предназначенного для централизованного управления доступом к API-сервисам искусственного интеллекта в условиях современных геополитических ограничений и вызовов. В работе детально рассматривается комплексная проблематика, охватывающая как существенный недостаток эффективных инструментов управления множественными API-ключами, так и критическую необходимость обеспечения надежного бесперебойного доступа к международным ИИ-сервисам для организаций, находящихся в регионах с ограниченным доступом к глобальным технологическим ресурсам. В качестве решения предложена многокомпонентная система, органично сочетающая передовые механизмы балансировки нагрузки с инновационными методами обхода региональных ограничений через специализированные серверы, расположенные в странах с открытым доступом. Разработанное решение включает в себя комплексные компоненты мониторинга, контроля и обеспечения многоуровневой безопасности. В рамках исследования проведен всесторонний сравнительный анализ существующих аналогов на рынке, выявлены их существенные ограничения в контексте решения проблемы геополитической доступности и представлено убедительное обоснование необходимости разработки качественно нового решения. Подробно описана техническая реализация ключевых компонентов системы с использованием современных технологий и подходов к разработке отказоустойчивого программного обеспечения корпоративного уровня. Полученные результаты исследования демонстрируют высокую эффективность предложенного решения для обеспечения стабильного доступа к ИИ-сервисам и оптимизации их использования в организациях различного масштаба, независимо от их географического положения и текущей геополитической обстановки.

Ключевые слова: API-менеджмент, middleware, искусственный интеллект, корпоративная безопасность, масштабируемость, геополитические ограничения, централизованное управление, балансировка нагрузки, оптимизация расходов, отказоустойчивость, прокси-сервер, API-безопасность, LLM-сервисы, управление доступом API, OpenAI API, Claude API.

Актуальность

В современных условиях организации, использующие API-сервисы искусственного интеллекта, сталкиваются с отсутствием эффективных инстру-

ментов для централизованного управления и контроля использования различных ИИ-сервисов. Существующие решения не предоставляют возможности гибкого распределения нагрузки между API-ключами, что приводит к неэффективному использованию ресурсов, превыше-

нию установленных лимитов запросов и, как следствие, к незапланированному увеличению операционных расходов. В условиях сложившихся геополитических ограничений доступа к международным ИИ-сервисам [1], организации нуждаются в надежном решении, способном обеспечить бесперебойный доступ к этим сервисам. Отсутствие комплексного решения для мониторинга, логирования и контроля расходов при использовании API различных ИИ-сервисов существенно затрудняет процесс принятия управленческих решений, снижает прозрачность использования ресурсов и создает дополнительные риски для информационной безопасности организации. Данная ситуация особенно критична для предприятий, где использование ИИ-сервисов интегрировано в ключевые бизнес-процессы и требует строгого контроля над расходами и соблюдением политик безопасности.

Формулировка задачи

В данной работе предлагается разработка программного обеспечения промежуточного уровня (middleware), выступающего в роли интеллектуального прокси-сервера для взаимодействия с различными провайдерами ИИ-сервисов. Данное ПО должно обеспечивать централизованное управление API-ключами, оптимизировать их использование посредством автоматической балансировки нагрузки и предоставлять администраторам гибкие инструменты контроля. В рамках предлагаемого решения необходимо реализовать систему мониторинга и журналирования всех операций, а также внедрить многоуровневую систему ограничений, позволяющую контролировать расходы, устанавливать лимиты по языковым единицам LLM моделей и управлять доступом с различных IP-адресов. Особое внимание уделяется безопасности и отказоустойчивости системы, обеспечивающим стабильную работу сервиса даже в условиях ограничения доступа к провайдерам ИИ-сервисов, вызванных геополитическими факторами, техническими сбоями в работе провайдеров, изменениями в региональном законодательстве или временными перебоями в работе телекоммуникационной инфраструктуры. Система должна обеспечивать непрерывность бизнес-процессов организации.

Анализ целевой аудитории

Разрабатываемое программное обеспечение ориентировано преимущественно на средние и крупные компании, активно внедряющие технологии искусственного интеллекта в свои бизнес-процессы, а также на разработчиков программного обеспечения, интегрирующих ИИ-сервисы в свои продукты. Данные организации характеризуются высоким уровнем использования API различных ИИ-сервисов и потребностью в оптимизации связанных с этим расходов. Особый интерес решение

представляет для компаний, находящихся в регионах с потенциальными ограничениями доступа к международным ИИ-сервисам. Вторичный сегмент целевой аудитории включает образовательные учреждения, исследовательские центры и технологические стартапы, которым необходим контролируемый и безопасный доступ к ИИ-сервисам. Ключевыми потребностями целевой аудитории являются оптимизация расходов, повышение безопасности при работе с API, улучшение контроля над использованием ресурсов и получение детальной аналитики использования сервисов. Важным фактором является готовность целевой аудитории инвестировать в решения, обеспечивающие стабильность и безопасность их бизнес-процессов, связанных с использованием ИИ-технологий.

Сравнение с существующими аналогами

Анализ существующих решений для управления доступом к API искусственного интеллекта выявил существенные ограничения в текущих предложениях на рынке. Большинство доступных решений не обеспечивает комплексного подхода к управлению API-ключами, имеет ограниченные возможности масштабирования и не предоставляет достаточных инструментов для мониторинга и обеспечения безопасности. В ходе исследования были проанализированы следующие основные решения: OpenAI API (как эталонная реализация) [2], ProxyAPI [3] и LiteLLM [4]. Каждое из этих решений имеет свои особенности и ограничения, что создает потребность в более совершенном инструменте для управления доступом к API искусственного интеллекта.

OpenAI API, являясь стандартным решением, не предоставляет возможностей для управления множественными ключами и распределения нагрузки, что существенно ограничивает возможности масштабирования и оптимизации расходов.

ProxyAPI предлагает доступ к различным провайдерам ИИ через единый интерфейс, однако имеет существенные недостатки: отсутствие возможности самостоятельного хостинга, наличие дополнительной наценки за использование и необходимость подписки для некоторых функций. Кроме того, решение не предоставляет возможностей для тонкой настройки ограничений и управления доступом.

LiteLLM, будучи открытым решением, предлагает хороший функционал для работы с различными провайдерами ИИ и имеет систему команд (teams). Однако данное решение не обеспечивает распределение нагрузки между ключами одного провайдера и имеет ограниченные возможности по установке лимитов и мониторингу безопасности. Большое количество функций привязано к Enterprise версии данного ПО.

Таблица 1.
Сравнение характеристик аналогов реализации

Характеристика	Наша реализация	OpenAI API	ProxyAPI	LiteLLM
Самостоятельный хостинг	ДА	НЕТ	НЕТ	ДА
Наценка за использование	НЕТ	НЕТ	ДА	НЕТ
Необходимость подписки	НЕТ	НЕТ	Частично	НЕТ
Распределение нагрузки между ключами одного провайдера	ДА	НЕТ	НЕТ	НЕТ
Ограничение общего количества IP для ключа	ДА	НЕТ	НЕТ	НЕТ
Лимиты по токенам/денежным средствам	ДА	ДА	НЕТ	ДА
Периодическое восстановление лимитов для ключа	ДА	НЕТ	НЕТ	ДА
Собственные лимиты на частоту запросов	ДА	НЕТ	НЕТ	ДА
Открытый исходный код	ДА	НЕТ	НЕТ	ДА
Поддержка множества провайдеров	ДА	НЕТ	ДА	ДА
Система команд (teams)	НЕТ	НЕТ	НЕТ	ДА
Логирование запросов	ДА	НЕТ	НЕТ	ДА
Настраиваемая модерация логов для безопасности	ДА	НЕТ	НЕТ	НЕТ
Автоматическое ограничение ключей при мошенничестве	ДА	НЕТ	НЕТ	НЕТ
Особые предложения для предприятий	НЕТ	ДА	НЕТ	ДА

Реализация компонентов

Для предлагаемой системы интеллектуального управления ключевыми компонентами являются: система управления API-ключами, балансировщик нагрузки, система контроля и ограничений, система мониторинга и логирования, административный интерфейс, а также система автоматической обработки и модерации запросов.

Система управления API-ключами:

- Реляционная база данных
- Классическое решение с использованием PostgreSQL или MySQL для хранения API-ключей, их метаданных и настроек. Обеспечивает надежность и целостность данных, поддерживает сложные связи между сущностями.

Балансировщик нагрузки:

- Round-robin распределение
- Простой алгоритм циклического перебора доступных API-ключей. Подходит для базового распределения нагрузки, но не учитывает текущую загруженность и лимиты ключей.
- Weighted round-robin
- Усовершенствованный алгоритм с учетом весов ключей, основанных на их лимитах и текущей нагрузке. Позволяет более эффективно распределять запросы.

Система контроля и ограничений:

- In-memory счетчики
- Хранение метрик использования в оперативной памяти с периодической синхронизацией в базу данных.

Система мониторинга и логирования:

- Локальное журналирование
- Запись логов в файловую систему с ротацией. Простое решение, подходящее для небольших систем.

Административный интерфейс:

- Web-интерфейс
- Классическое web-приложение с использованием современного фреймворка (React, Vue.js). Обеспечивает доступ через браузер с любого устройства.
- API-интерфейс
- REST API для программного управления системой. Позволяет интегрировать управление в существующие системы администрирования.

Система автоматической обработки и модерации запросов:

- Regex-фильтрация
- Использование регулярных выражений для базовой фильтрации контента. Подходит для простых проверок на наличие запрещенных слов, паттернов или форматов данных.
- Локальные LLM
- Использование легковесных LLM моделей (например, LLaMA, GPT-2) для локального анализа контента.
- API инструменты
- Использование специализированных API для модерации (например, OpenAI Moderation API, PerspectiveAPI).

Архитектура

Архитектура разрабатываемого программного обеспечения построена на принципах микросервисной архитектуры с разделением ответственности между

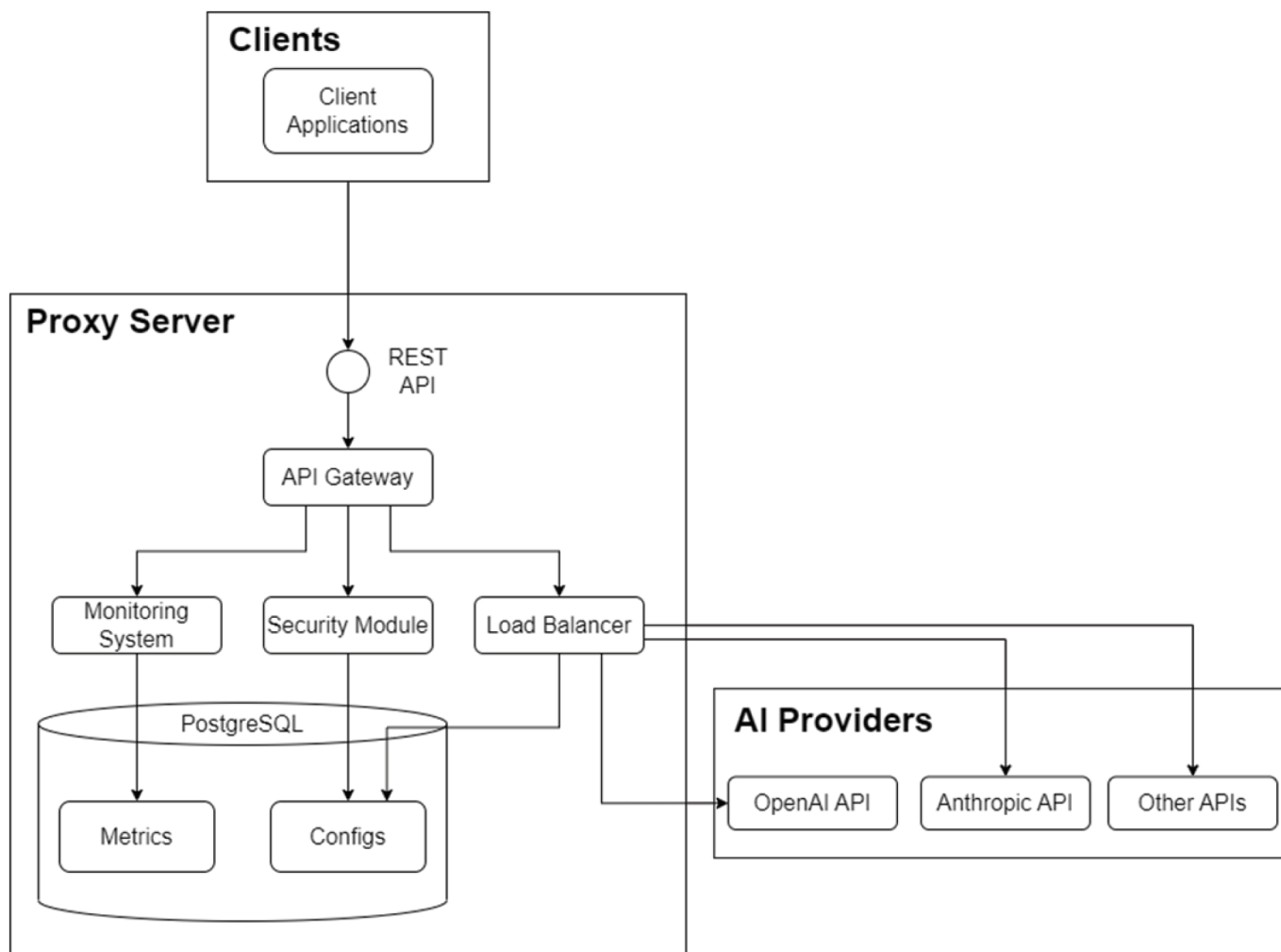


Рис. 1. Архитектура решения

компонентами. Это обеспечивает гибкость при модификации отдельных модулей и возможность горизонтального масштабирования. Система спроектирована с учетом требований масштабируемости, отказоустойчивости и безопасности.

- Архитектура включает следующих компонентов:
- Система управления API-ключами
- Балансировщик нагрузки
- Система контроля и ограничений
- Система мониторинга и логирования
- Административный интерфейс
- Система автоматической обработки и модерации запросов

Система управления API-ключами

Система управления API-ключами представляет собой критически важный компонент разрабатываемого программного обеспечения, реализованный на базе реляционной системы управления базами данных PostgreSQL[5]. Выбор PostgreSQL обусловлен его надежностью, производительностью и широкими возможностями для обеспечения целостности данных. В основе

данной системы лежит структура таблиц, позволяющая эффективно хранить и управлять информацией о API-ключях различных провайдеров, их текущем состоянии и установленных ограничениях.

Особое внимание в системе уделено безопасности хранения и обработки API-ключей. Все чувствительные данные должны храниться в зашифрованном виде с использованием алгоритма AES-256, а доступ к операциям с ключами строго контролируется через систему ролей и разрешений.

Балансировщик нагрузки

Балансировщик нагрузки реализован как интеллектуальная система распределения запросов между доступными API-ключами, использующая комбинированный подход на основе алгоритмов Round-robin и Weighted round-robin. Базовый механизм Round-robin обеспечивает равномерное распределение запросов между всеми доступными ключами, в то время как weighted-компонент учитывает дополнительные факторы, такие как оставшиеся лимиты ключей, их приоритет и истори-

ческую производительность. Это позволяет динамически адаптировать распределение нагрузки в зависимости от текущей ситуации и установленных ограничений.

Система контроля и ограничений

Система контроля и ограничений реализована на основе высокопроизводительного механизма in-memory счетчиков. Данный подход позволяет эффективно отслеживать и контролировать множество параметров, включая денежные лимиты, количество использованных токенов, частоту запросов и активность с различных IP-адресов. Периодическая синхронизация данных с основной базой данных обеспечивает надежное сохранение истории использования и возможность последующего анализа.

Система мониторинга и логирования

Система мониторинга и логирования реализована на базе локального механизма записи логов с использованием библиотеки logging. Данное решение обеспечивает надежное сохранение информации о всех запросах, их параметрах и результатах выполнения, при этом автоматическая ротация логов предотвращает чрезмерное использование дискового пространства и облегчает последующий анализ данных. Несмотря на свою простоту, такой подход полностью удовлетворяет требованиям системы на начальном этапе разработки и может быть легко масштабирован при необходимости.

Административный интерфейс

Административный интерфейс представлен в двух взаимодополняющих форматах: веб-интерфейс на базе React и программный REST API [6] интерфейс. Веб-интерфейс предоставляет удобный визуальный доступ к функциям управления системой, включая мониторинг активности, управление ключами и настройку ограничений, в то время как REST API обеспечивает возможность программной интеграции с существующими системами администрирования и автоматизации. Оба интерфейса используют единую систему аутентификации на основе токенов и поддерживают детальное разграничение прав доступа для различных критериев [7].

Система автоматической обработки и модерации запросов

Система автоматической обработки и модерации запросов реализована как многоуровневый механизм фильтрации и анализа контента. На первом уровне производится базовая фильтрация с использованием регулярных выражений для выявления очевидных нарушений и запрещенного контента. Второй уровень включает локальную обработку с помощью легковесной

LLM модели, которая анализирует семантику запросов на предмет потенциальных угроз безопасности [8]. Для особо важных случаев задействуется третий уровень — специализированные API модерации, такие как OpenAI Moderation API, обеспечивающие дополнительную проверку контента. Такой многоуровневый подход позволяет эффективно выявлять и блокировать потенциально опасные или неприемлемые запросы, сохраняя при этом высокую производительность системы.

Технологический стек

Backend:

- Python 3.11+ в качестве основного языка программирования
- FastAPI[9] как основной веб-фреймворк
- PostgreSQL для хранения данных
- Docker + Docker Compose[10] для контейнеризации

Ключевые библиотеки Python:

- httpx для асинхронных HTTP-запросов к API провайдеров
- pydantic для валидации данных и конфигурации
- python-jose для работы с JWT-токенами
- uvicorn: ASGI сервер

Frontend:

- React.js с TypeScript для разработки пользовательского интерфейса
- Material-UI или Tailwind CSS для стилизации компонентов
- React Query для эффективной работы с API

Заключение

Предлагаемая концепция программного обеспечения предоставляет уникальное решение для централизованного управления доступом к различным провайдерам ИИ-сервисов. Анализ существующих аналогов показал, что предлагаемое решение обладает рядом преимуществ, включая возможность самостоятельного хостинга, отсутствие дополнительных наценок и наличие расширенных функций безопасности и мониторинга. Разработанная концепция демонстрирует возможность создания надежной системы управления API-ключами с интеллектуальной балансировкой нагрузки, многоуровневой системой безопасности и детальным мониторингом использования ресурсов. Особую ценность представляет реализованный механизм автоматической модерации контента, сочетающий локальные и облачные решения для обеспечения максимальной защиты от потенциальных угроз.

Реализация данного проекта позволит организациям оптимизировать использование ИИ-сервисов, повысить

безопасность и эффективность работы с API, а также обеспечить стабильный доступ к сервисам в условиях возможных региональных ограничений. Дальнейшее развитие системы предполагает интеграцию с новыми провайдерами ИИ-сервисов и расширение функциональности для поддержки других типов API-сервисов, что значительно расширит возможности применения

решения в различных бизнес-контекстах. Планируемое внедрение корпоративного уровня поддержки с расширенными инструментами администрирования и интеграции сделает систему еще более привлекательной для крупных предприятий, нуждающихся в надежном и масштабируемом решении для управления API-сервисами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang, S.H. OpenAI — Explain Why Some Countries Are Excluded From ChatGPT / S.H. Wang // Nature. — 2023. — ISSN: 0028-0836. — eISSN: 1476-4687.
2. OpenAI API Documentation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://platform.openai.com/docs/> (дата обращения: 24.01.2025).
3. ProxyAPI Документация [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://proxyapi.ru/docs> (дата обращения: 24.01.2025).
4. LiteLLM Documentation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docs.litellm.ai/docs/> (дата обращения: 24.01.2025).
5. PostgreSQL Documentation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.postgresql.org/docs/> (дата обращения: 24.01.2025).
6. REST API Документация [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docs.github.com/ru/rest?apiVersion=2022-11-28> (дата обращения: 22.01.2025).
7. Аникин, Д.А. Анализ методов авторизации и аутентификации REST API / Д.А. Аникин // Информационные технологии и системы. — 2023. — С. 122. — eISSN: 2500-1752.
8. Денисов, Д.А. Искусственный интеллект как инструмент модерации контента / Д.А. Денисов // Современные информационные технологии. — 2024. — С. 19–22.
9. Docker Documentation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docs.docker.com/> (дата обращения: 24.01.2025).
10. FastAPI Documentation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://fastapi.tiangolo.com/> (дата обращения: 22.01.2025).

© Маципудра Петр Евгеньевич (matsipudra.pe@edu.spbstu.ru); Шмаков Владимир Эдуардович (shmakov_ve@spbstu.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ВЕКТОРИЗАЦИИ НАУЧНЫХ ТЕКСТОВ ДЛЯ МНОГОЗАДАЧНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНОГО ОБЪЕМА ДАННЫХ

STUDY OF VECTORIZATION METHODS OF SCIENTIFIC TEXTS FOR MULTI-TASK CLASSIFICATION BASED ON VARIOUS DATA VOLUMES

**K. Potapova
I. Isaeva
G. Gabrielyan**

Summary. The study analyzed different vectorization methods in task classification. Two statistical methods were selected for vectorization of scientific articles: bag of words and TF-IDF, as well as one neural network model word2vec. A comparative analysis of different clustering models was conducted, after which two models were selected for the experiment: a modification of logistic regression and a random forest. To assess the impact of input data volume on classification quality, three scenarios were used: using only titles, using titles and abstracts, and using titles, abstracts, and article texts. Each scenario was tested on all vectorization methods and selected classification models, which allowed us to identify the relationship between data completeness, vectorization type, and the resulting classification quality metrics.

Keywords: vectorization, scientific articles, machine learning, classification, semantic analysis.

Потапова Ксения Александровна
старший преподаватель, МИРЭА — Российский
технологический университет
potapova_k@mirea.ru

Исаева Ирина Андреевна
старший преподаватель, МИРЭА — Российский
технологический университет
isaeva_i@mirea.ru

Габриелян Гайк Ашотович
старший преподаватель, МИРЭА — Российский
технологический университет
gabrielyan@mirea.ru

Аннотация. В рамках исследования проведён анализ разных методов векторизации в задаче классификации. Выбраны два статистических метода для векторизации научных статей: мешок слов и TF-IDF, и одна нейросетевая модель word2vec. Проведён сравнительный анализ разных моделей кластеризации, после чего для эксперимента были выбраны две модели: модификация логистической регрессии и случайный лес. Для оценки влияния объёма входных данных на качество классификации использованы три сценария: использование только заголовков, использование заголовков и аннотаций, использование заголовков, аннотаций и текстов статей. Каждый сценарий тестировался на всех методах векторизации и выбранных моделях классификации, что позволило выявить зависимость между полнотой данных, типом векторизации и итоговыми метриками качества классификации.

Ключевые слова: векторизация, научные статьи, машинное обучение, классификация, семантический анализ.

Введение

Современный этап развития науки характеризуется экспоненциальным ростом объёма публикуемой информации. Ежегодно в международных базах данных индексируются миллионы научных статей, монографий, диссертационных исследований и иных форм академических публикаций, охватывающих разные научные области. Методы ручного присвоения УДК-индексов или тематической категоризации, подвержены человеческим ошибкам, и часто приводят к неточностям, затрудняющим поиск и анализ научных материалов.

Перспективным решением упорядочивания таких объёмов информации выступают алгоритмы, способные осуществлять анализ больших массивов научных текстов и выявлять скрытые паттерны связей между научными

публикациями. Этот механизм пригодится при решении множества задач: это и автоматизация классификации текстов, и выявление междисциплинарных научных работ, и организация научного сотрудничества. Однако невозможно анализировать текст, созданный человеком, без предварительной обработки. Одним из ключевых этапов предобработки текстовой информации является векторизация — процесс преобразования текстовых данных в числовой формат, пригодный для машинного анализа.

В статье рассмотрены основные применяемые методы векторизации текста: два статистических метода (мешок слов и TF-IDF) и один метод, основанный на нейронных сетях. Также проведён их сравнительный анализ для многозадачной классификации научных статей по четырём направлениям: физика, математика, информатика

и медицина. Для оценки результатов использованы метрики: точность, среднее взвешенное и макроусреднение. Использование этих метрик в совокупности позволяет получить более полную картину качества моделей в условиях неравномерного распределения классов.

Данные собраны из открытых ресурсов, векторизация и классификация проведены на языке Питон с использованием ряда библиотек: pandas, numpy, sklearn, gensim, seaborn, matplotlib.

Структура данных

Набор данных содержит 8567 строк и 22 столбца: у значения темы («section») четыре возможных значения: физика, математика, информатика и медицина. В столбцах «title», «annotation» и «text» соответственно содержатся заголовок, аннотация и текст статьи. В ходе анализа данных также будет использоваться столбец с датой.

На рисунках 1 и 2 представлены графики распределения статей в базе данных по годам написания и медианная длина статьи в зависимости от года написания.

Анализ методов векторизации

Для векторизации текстов выбраны методы мешок слов (CountVectorizer), взвешенный мешок слов (TF-IDF) и метод, основанный на использовании нейросетей для получения эмбедингов (Word2Vec). Word2Vec — это модель для создания векторных представлений слов, учи-

тывающая семантическую близость. TF-IDF — это статистическая мера для оценки важности слова в документе относительно коллекции документов, а мешок слов преобразует текст в матрицу частот слов, где каждая ячейка — количество употреблений слова в документе, без учёта семантики или значимости. Сравнительный анализ преимуществ и недостатков каждой модели приведён в таблице 1.

Анализ методов классификации

Для построения модели предсказания целевых переменных следует выбрать оптимальный алгоритм.

Так как основной целью исследования является сравнение разных моделей векторизации текстов, будем использовать только два алгоритма классификации: модификацию логистической регрессии и случайный лес. Логистическая регрессия является линейной моделью, которую часто используют в начале подбора оптимальной модели классификации, а её модификация позволяет не акцентировать внимание на подборе гиперпараметров. Случайный лес реализует ансамблевый подход, агрегирующий предсказания множества деревьев решений, обученных на случайных подвыборках данных и признаков. Его выбор связан со способностью выявлять нелинейные зависимости и устойчивостью к шуму. Таким образом, комбинация этих двух моделей обеспечивает диверсификацию критериев оценивания за счёт использования и линейного, и нелинейного подходов.

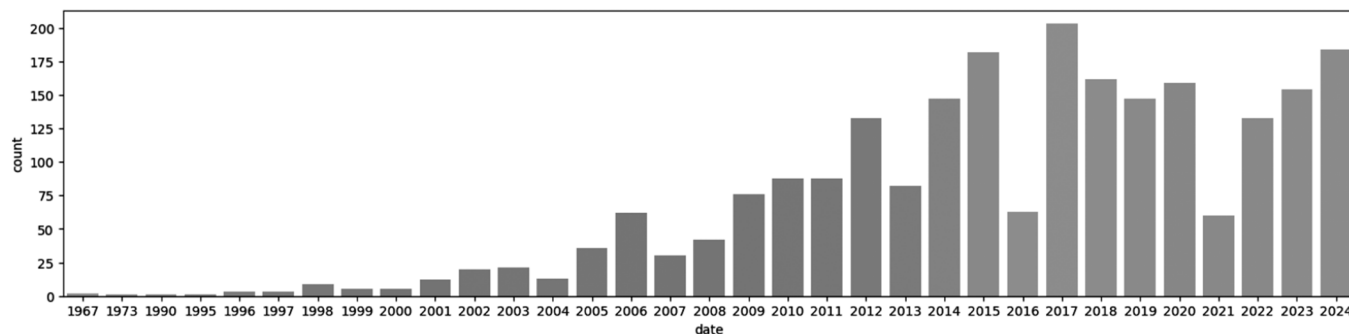


Рис. 1. Количество статей в базе данных по годам написания

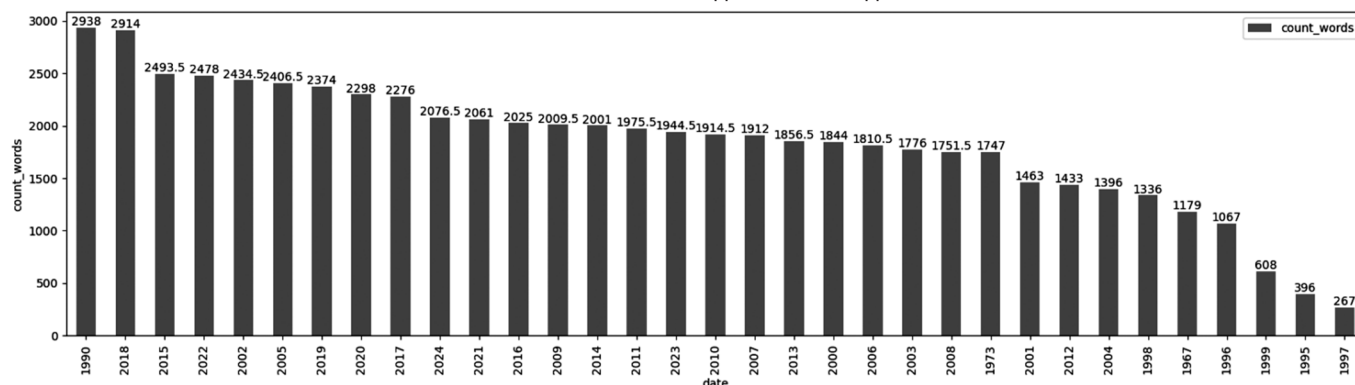


Рис. 2. Медианная длина статьи в зависимости от года написания

Таблица 1.

Сравнение разных методов классификации

Метод	Преимущества	Недостатки
CountVectorizer	Простота реализации Высокая скорость обработки данных Хорошая интерпретируемость	Не учитываются грамматические особенности текста Теряется семантический контекст слов [1]
TF-IDF	Учитывает зависимость важности слова от объёма текста [1] Простая вероятностная интерпретация результатов Хорошие результаты в задачах классификации [3]	Значение коэффициента встречаемости может быть низким за счёт большого количества синонимов в русском языке [2] Высокая зависимость от корпуса текстов
Word2Vec	Учитывает семантику слов [4] Хорошее масштабирование на большие объёмы текстовых данных	Требовательность к вычислительным ресурсам Неспособность работать со словами, которых не было в обучающем корпусе [4]

Таблица 2.

Сравнение разных методов классификации

Метод	Преимущества	Недостатки
DecisionTree	не требует тщательной предобработки данных модель способна обрабатывать нелинейные зависимости [5]	склонность к переобучению низкая обобщающая способность, требует тщательной настройки параметров
RandomForest	устойчив к переобучению работает с шумными данными	медленный на больших данных сложный в интерпретации
LogisticRegression	хорошо интерпретируемая модель быстрое обучение устойчивость к шуму с L2-регуляризацией	чувствительность к мультиколлинеарности не подходит для нелинейных задач [5]
LogisticRegressionCV	автоматический подбор параметров регуляризации более низкий риск переобучения чем у обычной логистической регрессии	сохраняет недостатки базовой логистической регрессии медленнее базовой логистической регрессии

В таблице 2 рассмотрены преимущества и недостатки использованных при сравнении моделей классификации: случайный лес (RandomForest), логистическая регрессия (LogisticRegression), модификация логистической регрессии (LogisticRegressionCV) и дерево решений (DecisionTree) [5].

Для построения модели классификации требуется разбить данные на обучающую и тестовую выборку [6]. Сначала будем использовать только заголовок статьи. Разбиваем в соотношении 0.33 тестовых данных и 0.66 обучающих данных.

Метрики

При оценке качества моделей использовались метрики:

- Точность (accuracy) — высчитывает правильно спрогнозированную долю выборки на основе истинно-положительных (TP), истинно-отрицательных (TN), ложно-положительных (FP) и ложно-отрицательных (FN) показателей (1):

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

- Среднее взвешенное (weighted avg) — усреднение метрик по классам с учетом их размера. w_i представляет собой вес, присвоенный каждому значению x_i . x_i — значение в наборе данных [7]. В среднем взвешенном каждый класс имеет вес, пропорциональный его размеру (2):

$$Weighted\ Average = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

- Макро усреднение (macro avg) — усреднение метрик по классам без учёта их размера. Для четырёх классов вес будет равен 0.25, а x_i — значение в наборе данных (3):

$$Macro\ average = \frac{0.25 * x_1 + 0.25 * x_2 + 0.25 * x_3 + 0.25 * x_4}{4} \quad (3)$$

Все требуемые метрики есть в методе `classification_report` библиотеки `sklearn` [8]. Также, для многозадачной

классификации отображается микросреднее — усреднение общего числа истинно положительных, ложно отрицательных и ложно положительных результатов для каждого класса, и метрики f-score, precision и recall. Примеры вывода можно увидеть на рисунках 7 и 8.

Мешок слов

Первый используемый метод — мешок слов. Он основан на идее простого подсчёта слов в документе.

Результатом применения метода CountVectorizer из библиотеки scikit-learn [9] является формирование разреженной матрицы признаков, где строки соответствуют документам, а столбцы — уникальным словам корпуса. Пример кода показан на рисунке 3.

Значения элементов матрицы отражают частоту встречаемости терминов в соответствии с лексикографическим порядком сортировки словаря [9]. Параметр ngram_range позволяет задать диапазон n-граммных комбинаций (например, (1, 2) для учета униграмм и биграмм), что обеспечивает сохранение зависимостей между словами.

После векторизации проведено обучение моделей случайный лес и модификации логистической регрессии. Использованы метрики точность (accuracy), macro avg, среднее взвешенное (weighted avg).

С увеличением количества данных метрики точности растут. На рисунке 4 показаны метрики обученных моделей логистической регрессии и случайного леса для обу-

чения на заголовках и аннотациях, а также для обучения на заголовках, аннотациях и текстах статей.

При анализе полученных метрик можно сделать вывод, что количество данных резко увеличивает качество классификации, доходя до 97% точности при использовании заголовка, аннотации и текста.

TF-IDF

Второй используемый метод векторизации основан на TF-IDF. Это статистическая мера для оценки важности слова в документе относительно коллекции документов. TF это частота, обозначающая, насколько часто определенное слово появляется в данном документе. IDF это обратная частота документа, она измеряет, насколько уникально слово является по всей коллекции документов. В формуле 4 n_k это число вхождений слова t в документ, $\sum_k n_k$ — общее количество слов в документе, $|D|$ — число документов в коллекции, $|\{d_i \in D | t \in d_i\}|$ — число документов из коллекции D , в которых встречается t :

$$tfidf = \frac{n_t}{\sum_k n_k} * \log \frac{|D|}{|\{d_i \in D | t \in d_i\}|} \quad (4)$$

TF-IDF присваивает высокий вес словам, которые часто встречаются в конкретном документе, но редко — в других документах корпуса.

Полученные метрики для моделей модифицированной логистической регрессии и классификатора случайного леса для разного количества используемых данных показаны на рисунке 5.

```
vec = CountVectorizer(ngram_range=(1,1))
bow = vec.fit_transform(X_train)
```

Рис. 3. Векторизация текстов методом «CountVectorizer»

Count Vectorizer	заголовок					заголовок, аннотация					заголовок, аннотация, текст				
log reg	precision	recall	f1-score	support		precision	recall	f1-score	support		precision	recall	f1-score	support	
	0.0	0.79	0.79	0.79	803	IT	0.82	0.84	0.83	476	IT	1.00	0.99	1.00	488
	1.0	0.64	0.62	0.63	666	math	0.71	0.74	0.72	367	math	0.97	0.93	0.95	394
	2.0	0.87	0.88	0.87	664	med	0.96	0.86	0.91	452	med	0.99	1.00	0.99	405
	3.0	0.76	0.78	0.77	695	physics	0.83	0.87	0.85	419	physics	0.94	0.97	0.96	427
	accuracy			0.77	2828	accuracy			0.83	1714	accuracy			0.97	1714
	macro avg	0.77	0.77	0.77	2828	macro avg	0.83	0.83	0.83	1714	macro avg	0.97	0.97	0.97	1714
	weighted avg	0.77	0.77	0.77	2828	weighted avg	0.83	0.83	0.83	1714	weighted avg	0.97	0.97	0.97	1714
Random forest	precision	recall	f1-score	support		precision	recall	f1-score	support		precision	recall	f1-score	support	
	0.0	0.74	0.69	0.71	868	IT	0.80	0.72	0.76	540	IT	1.00	1.00	1.00	486
	1.0	0.49	0.69	0.57	450	math	0.52	0.66	0.58	300	math	0.89	0.94	0.91	361
	2.0	0.75	0.79	0.77	643	med	0.85	0.87	0.86	397	med	1.00	0.98	0.99	418
	3.0	0.71	0.58	0.64	867	physics	0.75	0.69	0.72	477	physics	0.94	0.92	0.93	449
	accuracy			0.68	2828	accuracy			0.73	1714	accuracy			0.96	1714
	macro avg	0.67	0.69	0.67	2828	macro avg	0.73	0.73	0.73	1714	macro avg	0.96	0.96	0.96	1714
	weighted avg	0.69	0.68	0.68	2828	weighted avg	0.75	0.73	0.74	1714	weighted avg	0.96	0.96	0.96	1714

Рис. 4. Использование разного количества данных при обучении моделей логистической регрессии и случайного леса

TF-IDF	заголовок					заголовок, аннотация					заголовок, аннотация, текст				
logreg CV		precision	recall	f1-score	support		precision	recall	f1-score	support		precision	recall	f1-score	support
	IT	0.79	0.80	0.79	479	IT	0.82	0.83	0.83	479	IT	1.00	1.00	1.00	485
	math	0.61	0.62	0.62	372	math	0.70	0.73	0.71	364	math	0.94	0.94	0.94	381
	med	0.88	0.88	0.88	406	med	0.95	0.90	0.92	432	med	1.00	0.99	0.99	410
	physics	0.79	0.76	0.77	457	physics	0.85	0.85	0.85	439	physics	0.94	0.95	0.95	438
	accuracy			0.77	1714	accuracy			0.83	1714	accuracy			0.97	1714
	macro avg	0.77	0.77	0.77	1714	macro avg	0.83	0.83	0.83	1714	macro avg	0.97	0.97	0.97	1714
	weighted avg	0.77	0.77	0.77	1714	weighted avg	0.84	0.83	0.83	1714	weighted avg	0.97	0.97	0.97	1714
Random so m		precision	recall	f1-score	support		precision	recall	f1-score	support		precision	recall	f1-score	support
	IT	0.75	0.72	0.74	504	IT	0.78	0.70	0.74	538	IT	1.00	1.00	1.00	486
	math	0.52	0.63	0.57	317	math	0.53	0.65	0.58	312	math	0.88	0.94	0.91	357
	med	0.80	0.79	0.79	416	med	0.87	0.80	0.84	441	med	1.00	0.98	0.99	415
	physics	0.72	0.66	0.69	477	physics	0.69	0.72	0.70	423	physics	0.95	0.91	0.93	456
	accuracy			0.70	1714	accuracy			0.72	1714	accuracy			0.96	1714
	macro avg	0.70	0.70	0.70	1714	macro avg	0.72	0.72	0.72	1714	macro avg	0.96	0.96	0.96	1714
	weighted avg	0.71	0.70	0.71	1714	weighted avg	0.74	0.72	0.73	1714	weighted avg	0.96	0.96	0.96	1714

Рис. 5. Метрики качества разных моделей кластеризации с разным количеством данных для TF-IDF векторизации

В методе настроен параметр `max_features` — параметр, ограничивающий количество признаков в выходной матрице. Выбираются топ-N слов с наибольшей частотой встречаемости в корпусе и может значительно ускорить обучение моделей.

Можно заметить, что значения метрик незначительно выросли по сравнению с векторизацией текстов с помощью мешка слов. Сохраняется зависимость точности от размера используемых данных.

Word2Vec

Word2Vec это модель для создания векторных представлений слов, учитывающая семантическую близость. Архитектура модели на рисунке 6.

Модель состоит из двух компонентов — CBOW (Continuous Bag of Words) и Skip-Gram. Первый компо-

нент предсказывает целевое слово по его контексту в пределах заданного окна, Skip-Gram решает обратную задачу: по целевому слову предсказывает контекстные слова. В Skip-Gram входной вектор целевого слова проходит через скрытый слой, а на выходе модель генерирует вероятности для окружающих слов через несколько softmax-слоёв. В результате Word2Vec формирует векторные представления, где слова с похожим значением или ролью в предложении оказываются близко в векторном пространстве [11].

Для применения модели word2vec используем метод word2vec из библиотеки gensim [12]. Также необходима функция для преобразования векторов, так как в моделях классификации необходимы векторы одинаковой длины, поэтому все значения векторов, полученных в результате векторизации word2vec, надо дозаполнить нулями до достижения одинаковой длины. Отдельно

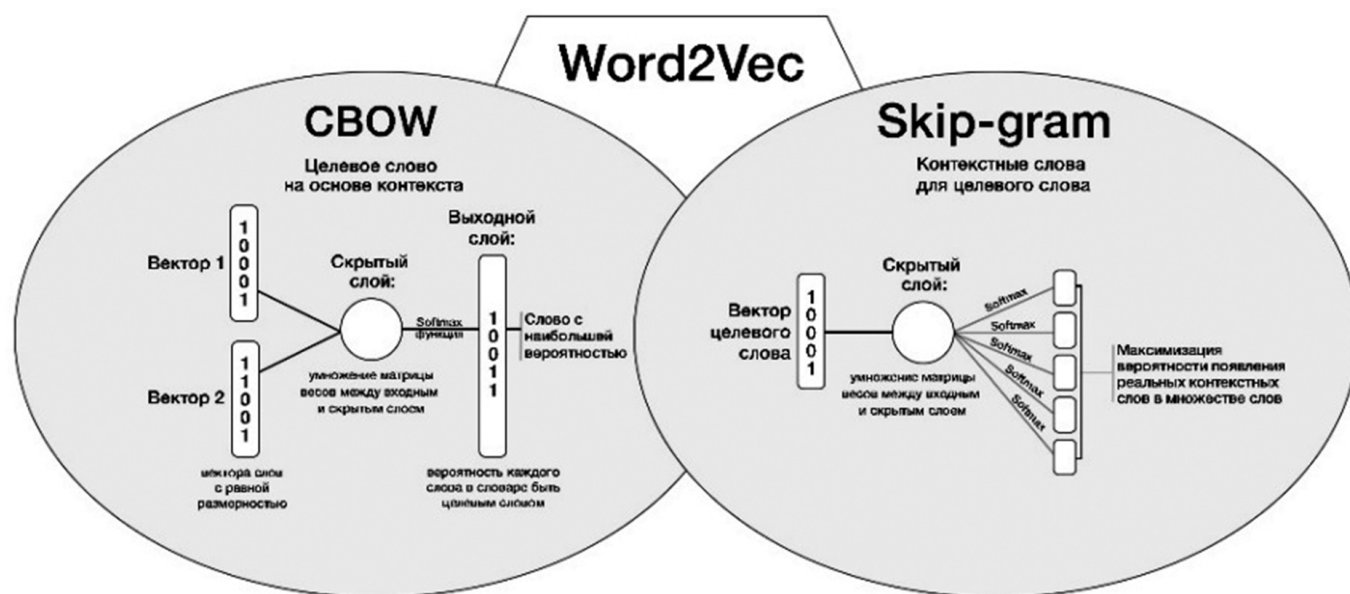


Рис. 6. Архитектура word2vec

```
word2vec_model = Word2Vec(sentences=df['title_tokens'], vector_size=100, window=5, min_count=1, workers=4)

# Функция для преобразования текста в усредненный вектор Word2Vec
def text_to_vector(tokens, model, vector_size=100):
    vectors = [model.wv[word] for word in tokens if word in model.wv]
    if len(vectors) > 0:
        return np.mean(vectors, axis=0)
    else:
        return np.zeros(vector_size)

# Преобразуем каждый заголовок в вектор
X = np.array([text_to_vector(tokens, word2vec_model) for tokens in df['title_tokens']])
```

Рис. 7. Пример использования модели word2vec из библиотеки gensim для заголовков

Word2vec	заголовок					заголовок, аннотация					заголовок, аннотация, текст				
		precision	recall	f1-score	support		precision	recall	f1-score	support		precision	recall	f1-score	support
logreg	IT	0.51	0.47	0.49	527	IT	0.66	0.66	0.66	488	IT	1.00	1.00	1.00	485
	math	0.38	0.45	0.41	323	math	0.44	0.52	0.47	319	math	0.88	0.89	0.89	377
	med	0.53	0.50	0.52	430	med	0.79	0.66	0.72	494	med	0.97	0.96	0.96	412
	physics	0.43	0.44	0.43	434	physics	0.57	0.60	0.58	421	physics	0.90	0.90	0.90	448
	accuracy			0.47	1714	accuracy			0.62	1714	accuracy			0.94	1714
	macro avg	0.46	0.47	0.46	1714	macro avg	0.61	0.61	0.61	1714	macro avg	0.94	0.94	0.94	1714
	weighted avg	0.47	0.47	0.47	1714	weighted avg	0.63	0.62	0.62	1714	weighted avg	0.94	0.94	0.94	1714
FRandom	IT	0.45	0.43	0.44	498	IT	0.58	0.54	0.56	521	IT	1.00	1.00	1.00	485
	math	0.34	0.39	0.36	336	math	0.33	0.43	0.37	298	math	0.86	0.87	0.86	379
	med	0.48	0.44	0.46	445	med	0.69	0.58	0.63	483	med	0.99	0.91	0.95	443
	physics	0.48	0.48	0.48	435	physics	0.45	0.49	0.47	412	physics	0.85	0.91	0.88	407
	accuracy			0.42	1714	accuracy			0.52	1714	accuracy			0.93	1714
	macro avg	0.42	0.42	0.42	1714	macro avg	0.51	0.51	0.51	1714	macro avg	0.92	0.92	0.92	1714
	weighted avg	0.42	0.42	0.42	1714	weighted avg	0.54	0.52	0.52	1714	weighted avg	0.93	0.93	0.93	1714

Рис. 8. Метрики качества разных моделей кластеризации с разным количеством данных для word2vec векторизации

применяем обученную модель для заголовков, аннотаций и текстов. Пример использования модели векторизации и вспомогательные функции на рисунке 7.

После этого можно обучить модели классификации и получить метрики. Результат на рисунке 8.

Качество модели стало хуже по сравнению с векторизацией текстов, основанных на статистических подходах.

Закключение

Сводный результат проведённого эксперимента показан в таблице 3.

В рамках проведённого исследования были проанализированы различные методы векторизации текстов для многозадачной классификации научных статей. Основной целью работы было сравнение метрик методов векторизации в зависимости от объёма входных данных и выбранных моделей классификации.

Наибольшая точность классификации (до 97 %) достигается при использовании полного текста статей вме-

сте с заголовками и аннотациями. Это подтверждает, что увеличение объёма данных значительно улучшает качество моделей. Мешок слов (CountVectorizer) и TF-IDF показали схожие результаты, с небольшим преимуществом TF-IDF в задачах классификации. Оба метода демонстрируют высокую точность при использовании полного текста статей. Word2Vec, несмотря на учёт семантической близости слов, показал более низкие результаты по сравнению с методами, основанными на статистических подходах.

Также проведённое исследование позволяет сделать вывод про качество моделей классификации, несмотря на то что это не являлось основной задачей: у модификация логистической регрессии метрики лучше по сравнению со случайным лесом в большинстве сценариев.

Таким образом, для задач классификации научных текстов, где важна точность и интерпретируемость результатов, рекомендуется использовать методы векторизации, основанные на статистических подходах.

Таблица 3.

Метрики точности для многозадачной классификации научных текстов с использованием разных методов векторизации текстов

Векторизация	Данные	Модель	accuracy	Macro avg	Weighted avg
Мешок слов	заголовок	LogisticRedressionCV	0.77	0.77	0.77
		RandomForestClassifier	0.68	0.67	0.68
	заголовок, аннотация	LogisticRedressionCV	0.83	0.83	0.83
		RandomForestClassifier	0.73	0.73	0.73
	заголовок, аннотация, текст	LogisticRedressionCV	0.97	0.97	0.97
		RandomForestClassifier	0.96	0.96	0.96
TF-IDF	заголовок	LogisticRedressionCV	0.77	0.77	0.77
		RandomForestClassifier	0.70	0.70	0.71
	заголовок, аннотация	LogisticRedressionCV	0.83	0.83	0.83
		RandomForestClassifier	0.72	0.72	0.73
	заголовок, аннотация, текст	LogisticRedressionCV	0.97	0.97	0.97
		RandomForestClassifier	0.96	0.96	0.96
Word2vec	заголовок	LogisticRedressionCV	0.47	0.46	0.47
		RandomForestClassifier	0.42	0.42	0.42
	заголовок, аннотация	LogisticRedressionCV	0.62	0.61	0.62
		RandomForestClassifier	0.52	0.51	0.52
	заголовок, аннотация, текст	LogisticRedressionCV	0.94	0.94	0.94
		RandomForestClassifier	0.93	0.92	0.93

ЛИТЕРАТУРА

- Горигорян Э.Г., Паршин М.Н., Методы NLP для предобработки текстовых данных и выделения признаков // Научный журнал «Бизнес и общество» №3(31) — 2021, стр. 1–8
- Булыга Филипп Сергеевич, Курейчик Виктор Михайлович // Сравнительный анализ методов векторизации текстовых данных большой размерности // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. №2 (232).
- Корюкин, А.В. Исследование влияния настроек TF-IDF векторизации текста на результаты бинарной классификации тональности / А. В. Корюкин // Математические методы в технологиях и технике. — 2021. — № 5. — С. 126–130. — DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_5_126. — EDN DBBXDL.
- Лыченко Н.М., Сорокова А.В., Сравнение эффективности методов векторного представления слов для определения тональности текстов // Математические структуры и моделирование 2019. №4(52) — Бишкек, Кыргызстан, стр. 97–110
- Краснянский М.Н., Обухов А.Д., Соломатина Е.М., Воякина А.А., Компьютерная лингвистика и обработка естественного языка // Вестник ВГУ, Серия: Системный анализ и информационные технологии №3 — 2018, стр. 173–182
- Майкл А. Лоунс, Как избежать ловушек машинного обучения: руководство для академических исследований // Школа математики и компьютерных наук — Эдинбург, Великобритания, 2024, стр. 1–33 — DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.02497>
- Формула средневзвешенного значения // Машинное обучение в Питоне [сайт]. 2024. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/weighted-average-formula/>
- Модуль sklearn, метрики, значение классов // Библиотека Scikit-learn : Машинное обучение в Питоне [сайт]. 2025. URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.classification_report.html
- Модуль sklearn, мешок слов // Библиотека Scikit-learn : Машинное обучение в Питоне [сайт]. 2025. URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.feature_extraction.text.CountVectorizer.html
- Модуль sklearn, векторизация TF-IDF // Библиотека Scikit-learn : Машинное обучение в Питоне [сайт]. 2025. URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.feature_extraction.text.TfidfVectorizer.html
- Батраева И.А., Нарцев А.Д., Лезгян А.С., Использование анализа семантической близости слов при решении задачи определения жанровой принадлежности текстов методами глубокого обучения // Вестник Томского государственного университета, «Управление, вычислительная техника и информатика» №50 — Томск, 2020, стр. 14–22
- Gensim, модели, word2vec // Библиотека Gensim: Глубокое обучение в Питоне [сайт]. 2025. URL: <https://radimrehurek.com/gensim/models/word2vec.html>

© Потапова Ксения Александровна (potapova_k@mirea.ru); Исаева Ирина Андреевна (isaeva_i@mirea.ru); Габриелян Гайк Ашотович (gabrielyan@mirea.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ТЕХНОЛОГИЯ АНАЛИЗА ТОНАЛЬНОСТЕЙ ТЕКСТОВ С ПОМОЩЬЮ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

TECHNOLOGY FOR ANALYZING TEXT TONES USING A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

**V. Remarchuk
B. Goryachkin
Ya. Gvozdeva
S. Malina**

Summary. Problem statement. Despite the existence of numerous sentiment analysis methods, their accuracy and effectiveness remain insufficient for solving complex tasks such as analyzing political and economic texts, predicting market trends, or ensuring security. Traditional approaches, including dictionary-based methods (e.g., SentiWordNet, AFINN) and combined techniques, demonstrate limited accuracy (72.7–78.2 %), making them unsuitable for tasks requiring high reliability. Moreover, these methods perform poorly in processing contextual dependencies, irony, sarcasm, and other complex linguistic constructs frequently encountered in texts.

Goal. Automatisation of sentiment analysis by developing corresponding software solutions to improve the objectivity of text analysis.

Results. CNN-based technology of sentiment analysis has been developed. 81.64 % accuracy has been achieved, superior to traditional techniques.

Practical significance. Practical significance of this study lies in its potential to enhance the quality of existing automated opinion extraction systems through the implementation of convolutional neural network (CNN)-based technology. These advancements can be directly applied to sentiment analysis systems that aggregate and process data in real-time across various platforms including social networks, customer reviews, and news sources. Proposed methodology enables more effective monitoring of sentiment patterns, which proves particularly valuable for detecting intentionally misleading content. By analyzing deviations in sentiment between entity pairs and comparing them against established baseline metrics within specific timeframes, the system can identify textual claims that demonstrate statistically significant anomalies, potentially indicating representations that diverge from factual reality. This capability holds particular relevance for applications requiring high-fidelity sentiment analysis, such as media monitoring, reputation management, and information verification systems, where distinguishing authentic sentiment from manipulated content becomes increasingly crucial in the digital information ecosystem. The CNN-based approach demonstrates superior performance in capturing nuanced linguistic patterns and contextual relationships compared to traditional sentiment analysis methods, thereby offering more reliable results for critical decision-making processes.

Keywords: sentiment analysis, text, automatisisation of sentiment analysis, machine learning, Convolutional Neural Network.

Ремарчук Валерий Николаевич

доктор философских наук, профессор,
Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана
3sgn703@mail.ru

Горячкин Борис Сергеевич

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

Гвоздева Яна Вячеславовна

Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана
yana@mehtco.ru

Малина Софья Владимировна

Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана
sofya_malina@inbox.ru

Аннотация. Постановка проблемы. Несмотря на существование множества методов анализа тональности текстов, их точность и эффективность остаются недостаточно высокими для решения сложных задач, таких как анализ политических и экономических текстов, прогнозирование рыночных трендов или обеспечение безопасности. Традиционные методы, включая анализ на основе словарей (например, SentiWordNet, AFINN) и комбинированные подходы, демонстрируют ограниченную точность (72.7–78.2 %), что делает их непригодными для задач, требующих высокой надежности. Кроме того, данные методы плохо справляются с обработкой контекстных зависимостей, иронии, сарказма и других сложных языковых конструкций, которые часто встречаются в текстах.

Цель. Автоматизация анализа тональности путем разработки соответствующего программного обеспечения в интересах повышения объективности исследования текстов.

Результаты. По результатам исследования разработана технология анализа тональности текстов на основе сверточных нейронных сетей (CNN), которая продемонстрировала точность 81,64 %, превзойдя традиционные методы.

Практическая значимость. Практическая значимость исследования заключается в возможности повышения качества действующих систем автоматического извлечения мнений, благодаря применению технологии на основе сверточных нейросетей. Эти данные могут применяться в системах анализа тональности, агрегирующих и анализирующих данные в режиме онлайн, таких как: социальные сети, отзывы, новостные ресурсы и т.д. Мониторинг тональных отношений может способствовать выявлению текстов, умышленно искажающих действительность, поскольку резкое отличие в тональности пар сущностей в тексте от среднего показателя в определенный промежуток времени может свидетельствовать о представлении в тексте фактов, которые не соответствуют действительности.

Ключевые слова: сентимент-анализ, текст, анализ тональности, автоматизация сентимент-анализа, машинное обучение, сверточные нейронные сети.

Введение

В современной аналитике с учетом регулярно модернизирующихся методов и технологий, проблемы изучения лексического значения слова [1], выявления семантических связей, понимания текстов, определения истинности [2] не теряют своей актуальности. При этом задача понимания тональности текста является наиболее обсуждаемой. Д.А. Поспелов [3] в своей работе говорит о проблеме интерпретации тональности текстов, как о «горячей» проблеме в процессе их понимания.

Оценка тонального компонента между объектами внутри текста стала интересовать исследователей относительно недавно, напротив тексты с явно выраженной оценкой давно являются объектом исследования анализа тональности.

По мнению авторов данной работы, наиболее близкое тематике исследования определение термина «анализ тональности» сформулировано компанией «Амазон»: Анализ тональности — это процесс анализа цифрового текста для определения того, является ли эмоциональный тон сообщения положительным, отрицательным или нейтральным [4].

Анализ тональности текстов находит применение во многих областях: оценка качества товаров и услуг по отзывам покупателей, анализ негативных и позитивных эмоций в сообщениях, прогноз фондовых рынков, политических ситуаций на основе новостных лент. Кроме подобных текстов тональность может быть выражена в блогах, микроблогах, комментариях пользователей, а также в публикациях, подготовленных журналистами. Не менее важным является применение анализа тональности при реализации формы общения «человек-машина» на естественном языке.

Анализ тональности текстов представляет широкий спектр для исследовательских возможностей поскольку позволяет провести оперативную систематизацию мнения широких общественных масс по конкретному вопросу или наоборот, проследить корреляцию между событиями. Например, предполагается, что внимание общества к курсу валюты, определенное из новостных экономических текстов, может снизить или повысить ее волатильность.

В последние несколько лет возрастает актуальность новостных потоков, посвященных проблеме инфекционных заболеваний. В этой области также находит применение sentiment-анализ, помогая проследить серьезность отношений к проблеме и наоборот.

Не менее значимы технологии автоматизированной оценки и для коммерческих организаций, которые ис-

пользуют данную технологию для изучения общественного мнения относительно своих товаров и услуг [5]. В число базовых задач, решаемых при помощи таких технологий в бизнес-сфере, относятся выявление причин популярности трендов на отраслевом рынке, изучение потребностей пользователей, которые не закрывают конкурентные компании, определение точек роста и развитие новых направлений.

Исследование авторов Kyle S. Van Houtan, Tyler Gagne, Clinton N. Jenkins, Lucas Joppa [6] посвящено возможности использования метода анализа тональности текстов научной литературы для упрощения мета-анализа эффективности тех или иных мер, применяемых в определенной научной сфере. Подобное приложение технологий автоматизации анализа текстов обретает актуальность в связи с резко возрастающими объемами научной литературы и, соответственно, многократно возросшим объемом работ по поиску и систематизации данных.

В настоящее время существует большое количество технологий осуществления анализа тональности текстов. Сравнительная характеристика основных из них, представлена в табл. 1.

Таблица 1.

Сравнительные показатели точности различных подходов к анализу тональности текстов

Технология		Точность работы алгоритма (%)	
		Максимальная	Минимальная
Технология sentiment-анализа на базе словарей SentiWordNet и AFINN	Технология на базе словаря SentiWordNet	72,7	63,5
	Технология на базе словаря AFINN	76,2	65,4
Технология на базе векторного представления слов FastText		71,3	52,8
Технология, основанной на машинном обучении с учителем		67	—
Комбинированный метод автоматического определения тональности текста		78,2	76,9

Однако, следует отметить, что значения параметров точности рассмотренных методов позволяют использовать технологии автоматизированного sentiment анализа исключительно для решения повседневных задач, таких как анализ отзывов в социальных сетях, формирование рейтинга у товаров и фильмов. Для решения политических, сложных экономических задач и задач обеспечения безопасности государства и граждан необходимо повышать точность проводимого анализа. В этой связи,

в рамках работы была предложена иная технология с высоким потенциалом вариативности и валидности.

Из существующих вариантов автоматизации сентимент-анализа, метод машинного обучения с учителем представляется наиболее подходящим для достижения цели исследования. При этом в качестве инструмента его реализации изначально было предложено использование рекуррентных нейронных сетей.

Рекуррентные нейронные сети — вид нейронных сетей, где связи между элементами образуют направленную последовательность. Благодаря этому появляется возможность обрабатывать серии событий во времени или последовательные пространственные цепочки. Поэтому такие сети применимы в задачах, где нечто целостное разбито на сегменты, например, распознавание тональности текста или речи. Известно исследование коллектива авторов из Intel и Carnegie-Mellon University [7] простимулировавшее прорыв в эмпирической оценке сверточных и рекуррентных сетей для задач обработки естественного языка.

В результате проведения систематической оценки общего у сверточных и рекуррентных нейросетей учеными университета Карнеги, выяснилось, что простая сверточная нейросеть превосходит канонические рекуррентные сети, в широком спектре задач и наборов данных, демонстрируя при этом большую эффективность использования памяти.

Сверточная нейронная сеть предназначена для выявления характерных локальных предикатов в большой структуре и их объединения в представление этой структуры вектором фиксированного размера, при этом она улавливает те локальные аспекты, которые наиболее информативны для решаемой задачи предсказания.

Изначально, сверточные нейронные сети, являющиеся одной из форм многослойных нейронных сетей, были предназначены для распознавания изображения, в силу того факта, что они устроены наподобие зрительной коры головного мозга — то есть умеют концентрироваться на небольшой области, выделять в ней важные особенности и обладают частичной устойчивостью к изменениям масштаба, смещениям, поворотам, смене ракурса и прочим искажениям. В этой связи, общую связь между моделированием последовательностей и рекуррентными сетями следует пересмотреть, а сверточные сети следует рассматривать как естественную отправную точку для задач обработки не только изображений, но и естественного языка [7].

Сверточные нейросети обладают рядом преимуществ:

- Один из лучших алгоритмов по распознаванию и классификации текстовой и графической ин-

формации в соответствии с исследованиями авторов;

- Меньшее количество настраиваемых весов, так как одно ядро весов используется целиком для всего объекта вместо того, чтобы делать для каждой ее составляющей свои персональные весовые коэффициенты;
- Удобное распараллеливание вычислений, и, следовательно, возможность реализации алгоритмов работы и обучения сети на графических процессорах;
- Обучение при помощи классического метода обратного распространения ошибки.

Однако, существуют некоторые ограничения в их применении: слишком много варьируемых параметров сети; в не полной мере определено, какие настройки нужны для каждой индивидуальной задачи и вычислительной мощности.

Сверточная нейронная сеть относится к нейронным сетям прямого распространения. Под прямым распространением понимается то, что распространение сигналов по нейронам идет по порядку, от первого слоя до последнего. Скрытых слоев в сети может быть достаточно много, всё зависит от количества данных и сложности задачи.

Основная особенность таких сетей заключается в наличии чередующихся слоев типа «свертка — субдискретизация», которых может быть множество. Операция свертки, подразумевает, что каждый фрагмент входа поэлементно умножается на небольшую матрицу весов (ядро), а результат суммируется. Эта сумма является элементом выхода, который называется картой признаков. Взвешенная сумма входов пропускается через функцию активации.

Слой пулинга (подвыборки, субдискретизации) представляет собой нелинейное уплотнение карты признаков, проходя нелинейное преобразование. Пулинг интерпретируется как разбиение карты признаков на более мелкие матрицы, нахождение их максимальных элементов, т. е. происходит увеличение «глубины» значений. Исходя из вышесказанного, актуальность исследования можно констатировать следующими положениями:

- Развитие подходов к изучению взаимосвязей между тональностью текстов и коммуникативными эффектами способствует улучшению коммуникативной связи между адресантом и адресатом.
- Широкий спектр приложений сентимент-анализа в различных областях (политике, экономике, социологии, аналитике, IT-среде, научной среде) свидетельствует о его полифункциональности и способствует прогнозированию длительного интереса в сфере его изучения.

- Существующие в настоящее время теории описания оценки тональности не позволяют применять их в полной мере для описания отношений между сущностями, что связывают с несовпадением понятий тональности и оценки, а также присутствием в анализируемых текстах сатирических приемов.
- Возрастающее число работ, а также формирование соревновательного интереса в области повышения точности осуществления сентимент-анализа свидетельствует о всеобщей заинтересованности в развитии данной проблемной области.
- Рассмотренные преимущества сверточных нейросетей раскрывают широкие применения их прикладного использования для в сентимент-анализе.

На основании вышеизложенного в данной статье будут отражены вопросы автоматизации анализа тональности путем разработки соответствующего программного обеспечения в интересах повышения объективности исследования текстов.

Материалы и методы

Для решения основных задач исследования была выбрана следующая архитектура сети:

1. Входной слой;
2. Слой свертки (convolution layer);
3. Карты признаков;
4. Слой субдискретизации (max pooling);
5. Карты признаков
6. Конкатенация карт признаков
7. Полносвязный скрытый слой;
8. Выходной слой.

На первом этапе входная матрица обрабатывается слоями свертки. Как правило, фильтры имеют фиксированную ширину, равную размерности признакового пространства, а для подбора размеров у фильтров настраивается только один параметр — высота h . Получается, что h — это высота смежных строк, рассматриваемых фильтром совместно. Соответственно, размерность выходной матрицы признаков для каждого фильтра варьируется в зависимости от высоты этого фильтра h и высоты исходной матрицы n .

Далее карта признаков, полученная на выходе каждого фильтра, обрабатывается слоем субдискретизации с определенной функцией уплотнения, т.е. уменьшает размерность сформированной карты признаков. Таким образом извлекается наиболее важная информация для каждой свертки независимо от её положения в тексте. Другими словами, для используемого векторного отображения комбинация слоев свертки и слоев субдискретизации позволяет извлекать из текста наиболее значимые n -граммы.

Затем, карты признаков, рассчитанные на выходе каждого слоя субдискретизации, объединяются в один общий вектор признаков. Он подается на вход скрытому полносвязному слою, а потом поступает на выходной слой нейронной сети, где и рассчитываются итоговые метки классов.

Описанная архитектура сверточной нейросети была реализована на языке Python 3.10. Выбор языка обусловлен его популярностью в области машинного обучения и наличием большого числа библиотек в открытом доступе.

Этапы реализации предлагаемой технологии заключаются в:

1. подборе данных для обучения;
2. предварительной обработке данных;
3. преобразовании слов к векторному представлению;
4. построении сверточной нейронной сети и ее обучении;
5. проведении качественного анализа результатов.

В качестве данных для обучения был выбран корпус коротких текстов [8], сформированный на основе русскоязычных сообщений в социальной сети ВКонтакте. Он содержит 114 991 положительных записей, 111 923 отрицательных, а также базу неразмеченных записей объемом 17 639 674 сообщений.

Перед началом обучения тексты прошли процедуру предварительной обработки:

- 1) Приведение к нижнему регистру;
- 2) Замена «ё» на «е»;
- 3) Замена ссылок на токен «URL»;
- 4) Замена упоминания пользователя на токен «USER»;
- 5) Удаление знаков пунктуации.

Далее набор данных был разбит на обучающую и тестовую выборку в соотношении 4:1, так как выбранная технология предполагает использование обучения с учителем.

Входными данными сверточной нейронной сети является матрица с фиксированной высотой n , где каждая строка представляет собой векторное отображение слова в признаковое пространство размерности k . Для формирования скрытого слоя нейронной сети, который необходим для перевода входной информации из высокомерного пространства в низкомерное, что позволяет сети лучше понять взаимосвязь между входами и эффективнее обрабатывать данные, была использована утилита дистрибутивной семантики Word2Vec [9].

Поскольку записям в социальных сетях характерна авторская пунктуация и эмодзи, определение гра-

ниц предложений становится достаточно трудоемкой задачей. Поэтому в предлагаемой технологии было введено допущение, что каждое сообщение содержит лишь одно предложение.

Исходная база неразмеченных записей хранилась в SQL-формате и содержала более 17,5 млн записей. Для удобства работы с ней была выполнена конвертация в SQLite.

Далее, с помощью открытой библиотеки для неконтролируемого тематического моделирования, индексации документов, поиска по сходству и других функций обработки естественного языка с использованием современных статистических методов машинного обучения — Gensim была обучена Word2Vec-модель со следующими параметрами:

- size = 200 — размерность признакового пространства;
- window = 5 — количество слов из контекста, которое анализирует алгоритм;
- min_count = 3 — слово должно встречаться минимум три раза, чтобы модель его учитывала

На следующем этапе каждый текст был отображен в массив идентификаторов токенов.

На основе анализа распределения длины текстов, была выбрана размерность вектора $s=26$, поскольку при данном значении полностью покрываются 99,71 % всех текстов в сформированном корпусе. Если при анализе количество слов в записи превышало высоту матрицы, оставшиеся слова отбрасывались и не учитывались в классификации.

Итоговая размерность матрицы предложения составила $s \times d = 26 \times 200$.

Далее, для построения нейронной сети была взята библиотека Keras, которая позволяет быстрее создавать и настраивать модели — схемы, по которым распространяется и подсчитывается информация при обучении.

В разработанной архитектуре использованы фильтры с высотой $h=(2, 3, 4, 5)$, которые предназначены для параллельной обработки биграмм, триграмм, 4-грамм и 5-грамм соответственно. Помимо этого, в нейронную сеть были добавлены по 10 свёрточных слоев для каждой высоты фильтра, функция активации — ReLU, которая определяет выходное значение нейрона в зависимости от результата взвешенной суммы входов и порогового значения.

После обработки слоями свертки, карты признаков поступали на слои субдискретизации, где к ним применялась операция пулинга, тем самым извлекая наиболее значимые n -граммы из текста.

Далее происходило объединение в общий вектор признаков (слой объединения), который подавался в скрытый полносвязный слой с 30 нейронами. В завершении, итоговая карта признаков подавалась на выходной слой нейронной сети с сигмоидальной функцией активации.

Результаты исследования

Для оценки эффективности используемой свёрточной нейросети на реальной выборке текстов было проведено ее обучение: скрытый слой был заморожен скры-

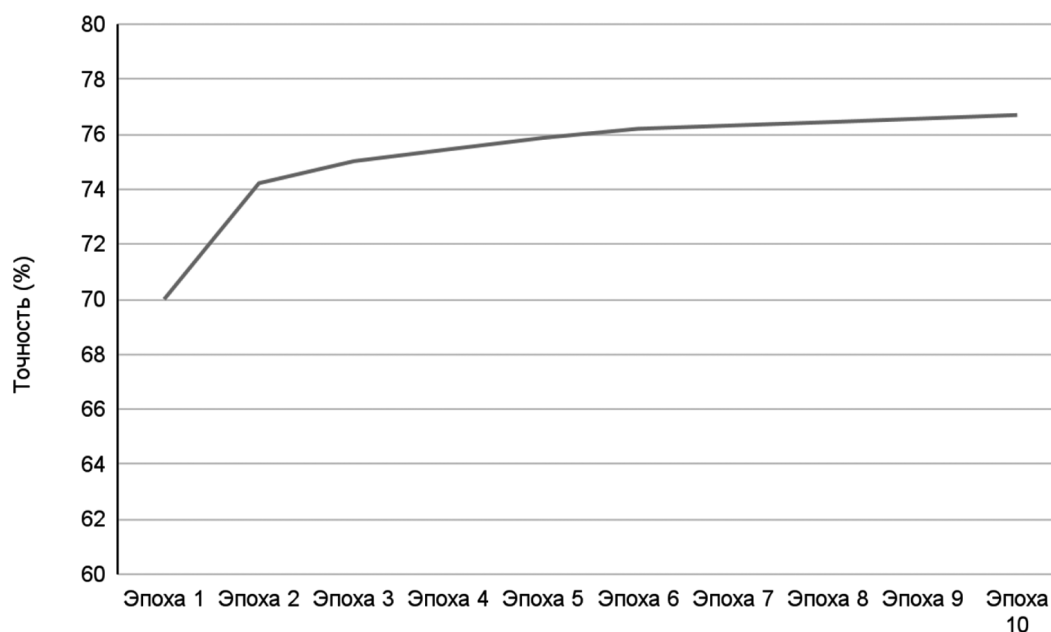


Рис. 1. Распределение значений точности по эпохам

тый, чтобы минимизировать изменения в нем, в то время как все остальные слои обучались в течение 10 эпох (рис. 1):

Из рисунка анализа графика точности видно, что пиковое значение метрики достигнуто на 10 эпохе обучения, после чего наблюдалось снижение показателей, что свидетельствовало о начале переобучения модели.

После завершения процесса обучения было оценено качество проведенного анализа тональности (табл. 2).

Таблица 2.

Первоначальные метрики качества классификации по классам тональности

Метка класса	Точность	Полнота	F-мера	Количество объектов
Negative	0.78194	0.78243	0.78218	22457
Positive	0.78089	0.78040	0.78064	22313
Total	0.78142	0.78142	0.78142	44770

Первоначальная оценка качества анализа тональности показала сбалансированные, но недостаточно высокие результаты: F-мера для классов Negative и Positive составила 0.78218 и 0.78064 соответственно при общей точности 0.78142. Это стало основанием для оптимизации архитектуры нейросети. Ключевыми изменениями стали увеличение размера пакетов данных для итеративного обучения и введение адаптивного темпа обучения, что позволило точнее корректировать шаг оптимизации при минимизации функции потерь. В результате изменения параметров удалось достичь лучшего качества анализа тональности (табл. 3).

Таблица 3.

Метрики качества классификации по классам тональности

Метка класса	Точность	Полнота	F-мера	Количество объектов
Negative	0.82143	0.82254	0.82249	22457
Positive	0.81137	0.81026	0.81031	22313
Total	0.8164	0.8164	0.8164	44770

Представленные результаты свидетельствуют о положительном влиянии модификации параметров, приводящей к значительному улучшению метрик. Значение F-меры для класса Negative возросло до 0.82249, для класса Positive — до 0.81031, а общая точность увеличилась на 3.5 процентных пункта, достигнув 0.8164.

Оценка полученных результатов

Проведенное исследование демонстрирует значительный потенциал применения сверточных нейронных сетей (CNN) в задачах анализа тональности текстов. Полу-

ченные результаты, отражающие общую точность модели на уровне 81.64 %, свидетельствуют о превосходстве предложенного подхода над традиционными методами, такими как анализ на базе словарей SentiWordNet (72.7 %) или комбинированные методы (78.2 %). Это подтверждает гипотезу о том, что способность CNN выявлять локальные лингвистические паттерны, включая n-граммы и контекстные зависимости, играет ключевую роль в повышении качества классификации. Успешное распознавание биграмм, триграмм и более длинных последовательностей позволило модели эффективнее улавливать скрытые семантические связи, которые часто определяют эмоциональный тон сообщения.

Улучшение метрик после оптимизации архитектуры сети, в частности увеличение F-меры для класса Negative до 0.82249, связано с адаптацией параметров обучения. Введение адаптивного темпа обучения и коррекция размера пакетов данных способствовали снижению риска переобучения, что видно по стабилизации графика точности на 10-ой эпохе. Однако сохраняющийся разрыв между метриками для классов Positive и Negative (0.81031 против 0.82249) указывает на необходимость дальнейшей работы с дисбалансом данных или особенностями лингвистических маркеров позитивных высказываний в русскоязычных соцсетях. Возможно, эмоциональная окраска положительных сообщений чаще выражается неявно, через контекст или иронию, что затрудняет их однозначную классификацию.

Важным аспектом исследования стало использование Word2Vec для векторного представления слов, что обеспечило учет семантической близости лексических единиц. Однако ограничение длины текстов до 26 токенов, хотя и покрывающее 99.71 % выборки, могло привести к потере информации в длинных сообщениях. Это подчеркивает необходимость адаптации модели для работы с разнородными данными, включая новостные статьи или научные тексты, где контекст может распределяться на большие расстояния. Кроме того, предобработка данных, исключая эмодзи и авторскую пунктуацию, хотя и упростила анализ, потенциально снизила точность, так как эти элементы часто несут значимую эмоциональную нагрузку.

Практическая значимость работы подтверждается возможностью применения модели в реальных сценариях — от мониторинга общественного мнения до прогнозирования рыночных трендов. Увеличение точности на 3.5 % может существенно повлиять на качество аналитических отчетов в бизнес-аналитике или политическом консалтинге. Тем не менее, для решения задач, требующих экстремальной точности (например, в сфере кибербезопасности или медицины), потребуется дальнейшая оптимизация, включая интеграцию с трансформерными архитектурами (BERT, GPT) и расширение обучающих корпусов за счет мультимодальных данных.

Перспективы исследования связаны с устранением выявленных ограничений. Эксперименты с динамическим определением длины входных последовательностей, включение механизмов внимания для анализа контекста и использование доменно-специфичных эмбедингов могут стать следующими шагами в развитии метода. Кроме того, учет культурных и жанровых особенностей текстов, таких как сатира или диалекты, позволит повысить универсальность модели, сохраняя ее эффективность в условиях растущего разнообразия цифрового контента.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность сверточных нейронных сетей (CNN) в задачах анализа тональности текстов. Разработанная модель, достигшая общей точности 81.64 %, продемонстрировала превосходство над традиционными методами, такими как анализ на основе словарей SentiWordNet (72.7 %) и комбинированные подходы (78.2 %). Это свидетельствует о том, что способность CNN выявлять локальные лингвистические паттерны, включая n-граммы и контекстные зависимости, обеспечивает более точную классификацию эмоционального окраса текстов. Успешная оптимизация архитектуры сети за счет адаптивного темпа обучения и коррекции размера пакетов данных позволила повысить F-меру для классов Negative

и Positive до 0.822 и 0.810 соответственно, что подтверждает гипотезу о гибкости CNN в обработке русскоязычного контента.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения модели для мониторинга общественного мнения в соцсетях, анализа рыночных трендов и улучшения коммуникации в системах «человек-машина». Однако сохраняющийся дисбаланс в метриках между классами, а также ограничения, связанные с обработкой длинных текстов и исключением эмотиконов, указывают на направления для дальнейших исследований. Перспективы развития метода включают интеграцию с трансформерными архитектурами (BERT), динамическое определение длины последовательностей и учет культурно-специфичных маркеров тональности.

Результаты работы вносят вклад в развитие методов автоматизированного анализа текстов, расширяя их применимость в политике, экономике и научной аналитике. Дальнейшая работа должна быть направлена на адаптацию модели к мультимодальным данным и доменно-ориентированным корпусам, что позволит преодолеть текущие ограничения и повысить надежность прогнозирования в критически важных сферах, таких как кибербезопасность и медицина.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семантический анализ для автоматической обработки естественного языка. URL: https://rdc.grfc.ru/2021/09/semantic_analysis/ (дата обращения: 19.02.2025)
2. Двойникова А.А., Карпов А.А. Аналитический обзор подходов к распознаванию тональности русскоязычных текстовых данных // Информационно-управляющие системы. 2020. №4 (107).
3. Поспелов Д.А. Прикладная семиотика и искусственный интеллект // Программные продукты и системы. 1996. №3. с.10–13.
4. Что такое анализ эмоциональной окраски. URL: <https://aws.amazon.com/ru/what-is/sentiment-analysis/> (дата обращения: 21.02.2025)
5. Базалей Т.Ю. Мониторинг и контроль общественного мнения путем цифровых технологий // Мир науки. Социология, филология, культурология. 2023. Т. 14. № 3.
6. Houtan K.S., Gagne T., Joppa L., Jenkins C. Sentiment analysis of conservation studies captures successes of species reintroductions // Patterns. 2020.
7. An Empirical Evaluation of Generic Convolutional and Recurrent Networks for Sequence Modeling. URL: arxiv.org/abs/1803.01271 (дата обращения 03.03.2025).
8. Рубцова Ю.В. Построение корпуса текстов для настройки тонового классификатора // Программные продукты и системы. 2015. №1(109). с.72–78.
9. Mikolov T. et al. Distributed Representations of Words and Phrases and Their Compositionality // Advances in Neural Information Processing Systems. 2013. с. 3111–3119.

© Ремарчук Валерий Николаевич (3sgn703@mail.ru); Горячкин Борис Сергеевич (bsgor@mail.ru);
Гвоздева Яна Вячеславовна (yana@mehtco.ru); Малина Софья Владимировна (sofya_malina@inbox.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ ТЕКСТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ О СОБЫТИЯХ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

MODERN APPROACHES TO THE ANALYSIS OF TEXTUAL INFORMATION ABOUT SECURITY EVENTS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

**A. Rusakov
K. Komarov
S. Koryagin
V. Koryagina**

Summary. In the context of the rapid growth of text information volumes, intelligent data analysis is becoming a key tool for processing and structuring information about vulnerabilities of information systems. This paper discusses methods for automating the analysis of text descriptions of vulnerabilities using artificial intelligence and machine learning technologies. The relevance of the study is due to the growth of cyber threats, especially after the COVID-19 pandemic, when the mass transition to remote work led to an increase in the number of attacks on government and commercial structures. In Russia, a number of regulations have been adopted to counter these threats, including Federal Law No. 187-FZ and FSTEC methods, but vulnerability analysis still requires significant time due to manual data processing. The article provides an overview of modern vulnerability description systems (CVE, CWE, NVD), methods for their classification, as well as approaches to automated processing of text data using software libraries and machine learning algorithms, and attention is also paid to reducing the size of the data and visualizing the results. The results of the study show that the use of text mining allows for faster and more accurate processing of vulnerability descriptions, which contributes to more effective cyber risk management.

Keywords: information security events, text mining, artificial intelligence methods.

Русаков Алексей Михайлович

старший преподаватель, МИРЭА — Российский
технологический университет.
rusakov_a@mirea.ru

Комаров Кирилл Юрьевич

МИРЭА — Российский технологический университет
kk7453603@gmail.com

Корягин Сергей Викторович

к.т.н. доцент,
МИРЭА — Российский технологический университет
dongenealog2003@mail.ru

Корягина Вероника Михайловна

МИРЭА — Российский технологический университет
koryagina.v.m@edu.mirea.ru

Аннотация. В условиях стремительного роста объемов текстовой информации интеллектуальный анализ данных становится ключевым инструментом для обработки и структурирования сведений об уязвимостях информационных систем. В статье рассматриваются методы автоматизации анализа текстовых описаний уязвимостей с применением технологий искусственного интеллекта и машинного обучения. Актуальность исследования обусловлена ростом киберугроз, особенно после пандемии COVID-19, когда массовый переход на удалённую работу привёл к увеличению числа атак на государственные и коммерческие структуры. В России для противодействия этим угрозам принят ряд нормативных актов, включая Федеральный закон №187-ФЗ и методики ФСТЭК, однако анализ уязвимостей по-прежнему требует значительных временных затрат из-за ручной обработки данных. В статье проведён обзор современных систем описания уязвимостей (CVE, CWE, NVD), методов их классификации, а также подходов к автоматизированной обработке текстовых данных с использованием программных библиотек и алгоритмов машинного обучения, также внимание уделено снижению размерности данных и визуализации результатов. Результаты исследования показывают, что применение интеллектуального анализа текстов позволяет ускорить и повысить точность обработки описаний уязвимостей, что способствует более эффективному управлению киберрисками.

Ключевые слова: события информационной безопасности, интеллектуальный анализ текстов, методы искусственного интеллекта.

Введение

В условиях интенсивного развития информационных технологий и цифровизации всех сфер жизнедеятельности общества проблема обеспечения информационной безопасности становится одной из наиболее острых и актуальных. Количество кибератак ежегодно стремительно растет, а их сложность постоянно увеличивается, что требует от организаций применения

передовых решений для своевременного обнаружения и эффективного реагирования на инциденты информационной безопасности.

Традиционные подходы к мониторингу и анализу событий безопасности, основанные на статических правилах и сигнатурах, зачастую оказываются недостаточно эффективными перед лицом эволюционирующих угроз. В связи с этим актуальной задачей является разработка

интеллектуальных систем, способных оперативно выявлять, анализировать и классифицировать события безопасности с применением современных методов искусственного интеллекта. Искусственный интеллект (ИИ), включая машинное обучение и глубокое обучение, предоставляет мощные инструменты для автоматизации процессов выявления угроз, анализа инцидентов и прогнозирования атак. Использование таких подходов позволяет существенно повысить точность обнаружения угроз, сократить время реагирования на инциденты и снизить нагрузку на специалистов по безопасности.

Концепция SIEM систем

Системы мониторинга событий и управления инцидентами безопасности (Security Information and Event Management, SIEM) являются ключевым компонентом современной инфраструктуры кибербезопасности. Такие системы предназначены для централизованного сбора, хранения и анализа данных о событиях безопасности из различных источников информации в корпоративной сети.

Назначение SIEM систем

SIEM-системы обеспечивают сбор событий безопасности, их агрегацию и фильтрацию, анализ на основании правил (корреляцию), мониторинг, расследование и вывод результатов в требуемом формате. По данным исследований, без использования SIEM среднее время обнаружения вторжения может составлять десятки или даже сотни дней, тогда как время, необходимое для компрометации инфраструктуры, сокращается до часов и минут, об этом говорится в статье [1].

Основные функции современных SIEM-систем включают:

- Сбор и консолидацию событий из различных источников (сетевые устройства, серверы, средства защиты).
- Нормализацию событий (приведение к единому формату).
- Корреляцию событий для выявления инцидентов безопасности.
- Оповещение о выявленных инцидентах.
- Визуализацию и формирование отчетов.
- Хранение событий для последующего анализа и расследования.

Тем не менее традиционные SIEM-системы сталкиваются с рядом ограничений при работе с современными сложными угрозами. Как отмечается в статье [2], организации сталкиваются с проблемами большого количества ложных срабатываний правил регистрации инцидентов информационной безопасности (ИБ), отсутствием классификации инцидентов и сложностями приоритизации.

SIEM регистрирует инциденты ИБ, но часто не выявляет взаимосвязь между ними и не позволяет раскрыть заранее спланированные сценарии кибератак.

Правила корреляции, являющиеся основным механизмом выявления инцидентов в традиционных SIEM-системах, имеют следующие ограничения:

- Большое количество ложных срабатываний, обработка которых перегружает аналитиков и мешает выявлять реальные угрозы, об этом упоминается в статье [3].
- Несоответствие некоторых атак правилам корреляции, из-за чего специалисты могут их не заметить.
- Изолированный анализ событий (без учета контекста), который снижает эффективность правил.

Учитывая эти ограничения, логичным шагом в развитии SIEM-систем является внедрение методов искусственного интеллекта и машинного обучения. Эти технологии позволяют преодолеть указанные недостатки за счет адаптивного анализа данных, выявления аномалий и прогнозирования угроз на основе исторических данных.

Методы корреляции событий безопасности в SIEM-системах

Корреляция событий безопасности является одним из ключевых процессов в SIEM-системах, позволяющим выявлять сложные инциденты безопасности путем установления взаимосвязей между отдельными событиями. Традиционные методы корреляции основаны на заранее определенных правилах и шаблонах, что делает их эффективными для обнаружения известных угроз, но ограниченными в условиях появления новых или модифицированных атак.

Процесс корреляции событий безопасности включает несколько этапов:

1. Сбор событий из различных источников.
2. Нормализация событий (приведение к единому формату).
3. Агрегация (объединение похожих событий).
4. Применение правил корреляции для выявления инцидентов.
5. Формирование оповещений о выявленных инцидентах.

Как отмечается в статье [4], процесс корреляции рассматривается как многоуровневая иерархия этапов, где каждый этап выполняет определенные операции с данными безопасности. Такой подход позволяет структурировать процесс и повысить его эффективность за счет последовательной обработки информации.

Современные методы корреляции событий безопасности можно классифицировать по различным призна-

кам. В зависимости от используемых алгоритмов и подходов выделяют следующие основные категории:

Правило-ориентированные методы

Эти методы используют заранее определенные правила для выявления связей между событиями. Правила создаются экспертами на основе знаний о типичных сценариях атак и могут быть эффективными для обнаружения известных угроз. Однако, как указывается в статье [5], такие методы имеют ограничения при работе с новыми или модифицированными типами атак, а также могут генерировать большое количество ложных срабатываний.

Статистические методы

Статистические подходы анализируют частоту и распределение событий для выявления аномалий, которые могут указывать на инциденты безопасности. Эти методы более гибкие по сравнению с правило-ориентированными, но требуют значительных вычислительных ресурсов и тщательной настройки для минимизации ложных срабатываний.

Методы на основе графов событий

В данном подходе события и их взаимосвязи представляются в виде графа, что позволяет анализировать сложные сценарии атак через изучение структуры графа. Как отмечается в статье [6], эти методы особенно эффективны для выявления многошаговых атак, но их применение ограничено высокой вычислительной сложностью при обработке больших объемов данных.

Методы на основе машинного обучения

Использование алгоритмов машинного обучения позволяет анализировать большие объемы данных и выявлять скрытые закономерности, которые могут указывать на угрозы. Такие методы способны адаптироваться к новым типам атак, но требуют значительных усилий для обучения моделей и подготовки данных.

Таким образом, современные SIEM-системы все чаще интегрируют методы искусственного интеллекта, включая машинное обучение, чтобы преодолеть ограничения традиционных подходов к корреляции событий безопасности. Это позволяет не только повысить точность обнаружения инцидентов, но и сократить время реакции на них.

Механизмы агрегации, нормализации и обогащения данных

Эффективная обработка событий безопасности требует применения механизмов агрегации, нормализации

и обогащения данных. Эти процессы являются критически важными для повышения качества и информативности собираемых данных.

Агрегация данных

Агрегация данных включает в себя объединение нескольких одинаковых событий в одно для уменьшения количества «мусора» в логах. Это особенно эффективно для логов межсетевых экранов и веб-серверов. В результате агрегации значительно уменьшается объем данных, которые необходимо хранить и анализировать, что повышает производительность SIEM-системы и упрощает работу аналитиков.

Агрегация может выполняться на основе различных признаков событий, таких как IP-адреса источника и назначения, порты, типы событий, временные метки и др. События, имеющие одинаковые значения выбранных признаков, объединяются в одно событие с указанием количества повторений.

Нормализация данных

Нормализация данных необходима для приведения данных к единому формату, что упрощает их обработку и анализ. События, поступающие из различных источников, имеют разный формат и содержат разные поля, что затрудняет их совместный анализ. Нормализация позволяет решить эту проблему, приводя все события к единому формату с определенным набором полей.

В работе [7] авторы определяют нормализацию как фундаментальную функцию SIEM-систем, обеспечивающую мониторинг и анализ событий безопасности в режиме реального времени. Процесс нормализации должен учитывать специфику каждого источника данных, что представляет особую сложность при интеграции разнородных систем. Правила корреляции строятся на основе нормализованных событий, что напрямую влияет на точность правил корреляции. Корректная нормализация позволяет более точно выявлять связи между событиями и повышает эффективность работы SIEM-системы в целом.

Обогащение данных

Обогащение данных включает в себя добавление дополнительной информации из внешних источников, таких как базы данных угроз, для повышения точности анализа. Это позволяет оперативно реагировать на новые виды атак и повышает эффективность выявления инцидентов безопасности.

В процессе обогащения к данным о событиях безопасности добавляется контекстная информация, как со-

бытийная, так и не событийная, с целью преобразования исходных данных в содержательные. События безопасности могут быть обогащены контекстной информацией из справочников пользователей, средств инвентаризации активов (например, CMDB), средств геолокации, сторонних баз данных анализа угроз и множества других источников, подробнее о важности обогащения данных можно узнать в источнике. Обогащенные данные позволяют SIEM более эффективно выполнять обнаружение угроз, поиск угроз и реагирование на инциденты. Использование обогащенных данных делает борьбу с угрозами безопасности более простой и эффективной.

Применение методов искусственного интеллекта в анализе событий безопасности

Современные SIEM-системы всё чаще интегрируют технологии искусственного интеллекта для повышения эффективности обнаружения и предотвращения угроз. В работе Котенко И.В. [7] отмечается, что применение методов ИИ позволяет автоматизировать процессы анализа больших объёмов данных и выявления сложных зависимостей между событиями безопасности. Это особенно актуально в контексте растущего объёма генерируемых данных и усложнения векторов атак.

Методы машинного обучения для обнаружения аномалий

Для выявления аномального поведения в сетевом трафике и действиях пользователей применяются различные методы машинного обучения. Как показано в исследовании Котенко И.В. и Левшуна Д.А. [7], эти методы можно классифицировать на три основные категории: обучение с учителем, без учителя и с частичным привлечением экспертных знаний. Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и ограничения при применении к задачам информационной безопасности.

Методы обучения без учителя не требуют предварительной разметки данных, что делает их особенно ценными для обнаружения ранее неизвестных типов атак. В работе [7] подчёркивается, что алгоритмы кластеризации, такие как k-means и DBSCAN, позволяют эффективно группировать события безопасности по схожим признакам, выявляя аномальные кластеры. Иерархический кластерный анализ (HCA), детально описанный в том же исследовании, динамически формирует кластеры на основе IP-адресов, временных меток и типов действий, что позволяет адаптироваться к изменяющемуся характеру угроз.

Авторы [7] доказывают, что методы поиска ассоциативных правил выявляют скрытые зависимости между атрибутами событий безопасности, что критически важно для построения комплексной картины атаки. Там же

демонстрируется, что алгоритмы понижения размерности, такие как PCA и t-SNE, повышают эффективность визуализации и анализа многомерных данных о событиях безопасности, сокращая вычислительные затраты без значительной потери информативности.

Алгоритмы обучения с учителем, такие как Random Forest (RF) и Support Vector Machine (SVM), требуют наличия размеченных наборов данных, но обеспечивают высокую точность классификации известных типов атак. В исследовании [8] показано, что ансамблевые методы на основе деревьев решений достигают точности до 97 % при выявлении DDoS-атак на корпоративные ресурсы. Там же отмечается, что SVM с нелинейными ядрами эффективен при классификации сложных типов атак с пересекающимися признаковыми пространствами.

Выбор конкретного метода машинного обучения должен осуществляться с учётом специфики задачи и доступных ресурсов. Как подчёркивается в [7], для линейно разделимых классов атак и небольших объёмов данных оптимальным является применение классических алгоритмов, таких как логистическая регрессия и SVM. В то же время, в работе [7] демонстрируется, что для сложных нелинейных зависимостей и больших массивов данных предпочтительно использование методов глубокого обучения, способных автоматически извлекать информативные признаки из сырых данных.

Методы обнаружения многошаговых кибератак

Многошаговые кибератаки представляют особую сложность для обнаружения, поскольку отдельные этапы могут выглядеть как легитимные действия. Проблема усугубляется тем, что этапы атаки могут быть разнесены во времени и исходить от различных источников. В исследовании [17] предложена методология выявления таких атак на основе построения графов зависимостей между событиями безопасности. Авторы демонстрируют, что графовое представление позволяет устанавливать причинно-следственные связи между разрозненными событиями, восстанавливая полную картину атаки.

Рекуррентные нейронные сети (RNN) с механизмом долгой краткосрочной памяти (LSTM) рассматриваются в работе [7] как эффективный инструмент анализа временных последовательностей событий безопасности. Авторы показывают, что архитектура Bi-LSTM с механизмом внимания позволяет учитывать как предшествующий, так и последующий контекст событий, что критически важно для выявления растянутых во времени атак. Экспериментальная оценка на наборе данных DARPA 2000 демонстрирует превосходство этого подхода над традиционными методами.

В том же исследовании [7] предложена комбинированная архитектура на основе сверточных нейронных

сетей (CNN) и авторегрессионных моделей для анализа последовательностей событий безопасности. Авторы демонстрируют, что такой подход позволяет эффективно выявлять локальные и глобальные паттерны в данных, достигая точности 93 % при обнаружении APT-атак на корпоративные ресурсы.

Как отмечается в работе [7], увеличение числа слоёв в глубоких нейронных сетях приводит к повышению полноты обнаружения атак, что особенно ценно при работе с ранее неизвестными типами угроз. Автор предлагает адаптивную архитектуру, способную динамически изменять свою глубину в зависимости от сложности анализируемых данных, что позволяет оптимизировать вычислительные ресурсы при сохранении высокой точности обнаружения.

Трансформерные архитектуры, представленные в исследовании [9], демонстрируют высокую эффективность при анализе длинных последовательностей событий безопасности. Автор показывает, что механизм самовнимания позволяет устанавливать связи между удалёнными во времени событиями, что критически важно для выявления многошаговых атак с большими временными интервалами между этапами.

Прогностическая аналитика для предсказания угроз

Прогностическая аналитика использует исторические данные о событиях безопасности для предсказания вероятности возникновения инцидентов в будущем. В работе [10] представлена методология прогнозирования кибератак на основе анализа временных рядов с применением авторегрессионных моделей интегрированного скользящего среднего (ARIMA). Автор демонстрирует, что данный подход позволяет выявлять сезонные паттерны в активности злоумышленников и прогнозировать всплески атак определённого типа.

Модели глубокого обучения для прогнозирования рассматриваются в исследовании [11], где предложена архитектура Temporal Fusion Transformers (TFT) для анализа многомерных временных рядов событий безопасности. Автор показывает, что TFT эффективно обрабатывает как внутренние зависимости в данных, так и внешние факторы, такие как информация об уязвимостях и глобальных киберугрозах. Экспериментальная оценка демонстрирует точность прогнозирования DDoS-атак на уровне 87 % с горизонтом до 7 дней.

Федеративное обучение с гомоморфным шифрованием, описанное в работе [7], позволяет обучать модели прогнозирования на распределённых наборах данных без нарушения конфиденциальности. Это особенно важно в контексте межорганизационного обмена информа-

цией об угрозах, где прямая передача данных о событиях безопасности может быть нежелательна по юридическим или коммерческим причинам.

Для интерпретации результатов прогнозирования ключевыми становятся методы объяснимого искусственного интеллекта. В исследовании [12] представлено применение методов SHAP (SHapley Additive exPlanations) и LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) для визуализации вклада различных факторов в прогноз кибератак. Автор демонстрирует, что эти подходы повышают доверие аналитиков к результатам работы моделей и позволяют выявлять ключевые индикаторы компрометации.

Графовые нейронные сети (GNN), интегрированные в архитектуру MDSTFT (Multi-Dimensional Spatio-Temporal Fusion Transformer), позволяют анализировать пространственно-временные зависимости в цепочках событий безопасности, как показано в работе [13]. Авторы демонстрируют, что данный подход снижает ошибку прогноза целевых атак на 22 % по сравнению с классическими LSTM-моделями за счёт учёта топологической структуры корпоративной сети.

Интеграция методов ИИ в практические решения

Эффективное внедрение методов искусственного интеллекта в SIEM-системы требует решения ряда практических задач. В исследовании [10] рассматриваются подходы к оптимизации вычислительных ресурсов при обработке больших объёмов данных о событиях безопасности. Автор предлагает методологию распределённых вычислений на основе фреймворка Apache Spark, позволяющую масштабировать алгоритмы машинного обучения при сохранении высокой скорости обработки.

Проблема недостатка размеченных данных для обучения моделей решается с помощью методов полуавтоматической разметки и активного обучения. В работе [14] представлен подход к формированию репрезентативных наборов данных для обучения моделей выявления атак с минимальными затратами на ручную разметку. Авторы демонстрируют, что активное обучение с использованием метрики неопределённости позволяет сократить объём ручной разметки на 67 % при сохранении высокой точности классификации.

Интеграция экспертных знаний в модели машинного обучения рассматривается в исследовании [7], где предложен нейросимволический подход к анализу событий безопасности. Автор показывает, что комбинирование статистических методов с формализованными правилами, основанными на экспертных знаниях, позволяет существенно снизить количество ложных срабатываний и повысить интерпретируемость результатов.

В контексте критической информационной инфраструктуры особую важность приобретает устойчивость моделей к состязательным воздействиям. В работе [15] исследуются методы повышения робастности алгоритмов машинного обучения к атакам на данные и модели. Автор демонстрирует, что применение методов состязательного обучения и ансамблевых подходов позволяет значительно повысить устойчивость систем обнаружения вторжений к целенаправленным атакам на компоненты искусственного интеллекта.

Перспективные направления развития

Анализ текущего состояния и тенденций развития методов искусственного интеллекта в кибербезопасности позволяет выделить несколько перспективных направлений исследований. В работе [7] рассматривается концепция непрерывного обучения (Continual Learning) для адаптации моделей к эволюционирующим угрозам. Автор предлагает архитектуру, способную инкрементально обновлять свои знания без катастрофического забывания ранее изученных паттернов атак.

Интеграция мультимодальных данных (сетевой трафик, журналы событий, метрики производительности) рассматривается в исследовании [16] как способ повышения контекстной осведомленности систем безопасности. Авторы демонстрируют, что объединение разнородных источников данных с помощью специализированных нейросетевых архитектур позволяет выявлять сложные взаимосвязи и повышать точность обнаружения угроз на 28%.

В контексте автоматизации реагирования на инциденты особую значимость приобретают методы обучения с подкреплением. В работе [7] представлен подход к оптимизации стратегий реагирования на основе глубокого Q-обучения (Deep Q-Learning). Автор показывает, что данный метод позволяет системе самостоятельно вырабатывать оптимальные последовательности действий для нейтрализации различных типов угроз, адаптируясь к изменяющимся условиям функционирования защищаемой системы.

Современные тенденции в развитии SIEM-систем с использованием искусственного интеллекта: новое поколение систем мониторинга

Современные SIEM-системы активно эволюционируют в направлении интеграции методов искусственного интеллекта для повышения эффективности выявления и анализа инцидентов безопасности. Как отмечается в исследовании Котенко И.В. и соавторов в статье [18], технологии искусственного интеллекта трансформируют традиционные SIEM-решения, создавая новый класс систем мониторинга — AI-SIEM. Эти системы выходят

за рамки классических, основанных на правилах фреймворков, предлагая значительно более эффективные механизмы обнаружения угроз, прогнозную аналитику и автоматизированные процессы реагирования.

Согласно результатам исследования [19], современные AI-SIEM включают шесть ключевых компонентов:

1. Продвинутое машинное обучение гетерогенных данных
2. Интеграция с источниками больших данных (Big Data)
3. Распознавание сложных паттернов атак
4. Автоматизированный анализ с минимальным участием человека
5. Прогностическая аналитика на основе исторических данных
6. Интеллектуальные механизмы реагирования

Интеграция ИИ в SIEM-системы позволяет эффективно решать проблему растущей сложности и объема киберугроз, делая кибербезопасность более проактивной и интеллектуальной. В работе [20] авторы демонстрируют, что применение технологий машинного обучения в SIEM повышает точность выявления целевых атак по сравнению с традиционными правило-ориентированными системами.

Сервисная модель и облачные SIEM-решения

Отчетливой тенденцией в развитии современных SIEM-систем становится переход к облачным решениям и сервисным моделям предоставления услуг. Исследование [21] показывает, что классический подход к работе с SIEM требует существенных инвестиций со стороны организаций на покупку длительных лицензий и внедрение продукта, при этом эти инвестиции необходимо регулярно повторять при изменениях инфраструктуры.

В противовес этому, современные компании стремятся повышать свою устойчивость и адаптируемость к изменениям, что характеризуется следующими запросами:

- Ориентация на оплату за фактическое потребление (Pay-as-you-go)
- Делегирование все большего объема работ подрядчикам для фокусирования на основном бизнесе
- Возможность динамически менять объемы потребления ресурсов
- Масштабируемость без дополнительных капитальных затрат

Авторы работы [22] отмечают, что модели Managed SIEM и SIEM-as-a-Service становятся все более популярными, особенно среди организаций с ограниченными ресурсами на поддержание собственного центра мониторинга безопасности (SOC). Такой подход позволяет компаниям получить доступ к передовым технологиям мониторинга событий безопасности без необходимости

содержать штат высококвалифицированных специалистов.

Расширенная автоматизация и конвергенция с координацией

Третьей значимой тенденцией в развитии SIEM-систем является интеграция функциональности систем автоматизации и оркестрации безопасности (Security Orchestration, Automation and Response, SOAR). Авторы исследования [23] подчеркивают, что эта тенденция продиктована объективной необходимостью целостного решения задач обеспечения информационной безопасности. Заказчики отталкиваются от процесса работы, а не от набора функций, описанных в отчетах аналитических агентств, и разделение возможностей обнаружения и реагирования между несколькими отдельными продуктами противостоит с точки зрения практического использования.

В работе [12] демонстрируется, что интеграция функций SOAR в SIEM-системы позволяет решить две ключевые проблемы:

1. Сократить время реагирования на инциденты благодаря автоматизации рутинных операций
2. Повысить эффективность работы аналитиков за счет уменьшения числа ложных срабатываний и более точной приоритизации событий

Экспериментальные результаты, представленные в исследовании [24] показывают, что применение комбинированных SIEM+SOAR решений позволяет сократить среднее время обработки инцидента (Mean Time to Respond, MTTR) на 67 % по сравнению с традиционными подходами, основанными на ручной обработке событий безопасности.

Можно ожидать дальнейшего взаимопроникновения SOAR и SIEM, что приведет к развитию функций оркестрации и автоматизации непосредственно в рамках SIEM-продуктов, формируя новое поколение интегрированных платформ безопасности.

Выводы

Традиционные SIEM-системы, основанные на правилах корреляции, имеют ряд ограничений при выявлении современных сложных угроз, таких как многошаговые кибератаки. Эти ограничения включают высокий уровень ложных срабатываний, неспособность выявлять ранее неизвестные типы атак и изолированный анализ событий без учета контекста. Применение методов искусственного интеллекта и машинного обучения в SIEM-системах позволяет преодолеть эти ограничения и повысить эффективность выявления инцидентов безопасности. Методы машинного обучения, такие как методы обучения без учителя, особенно эффективны для выявления аномалий и ранее неизвестных угроз.

Механизмы агрегации, нормализации и обогащения данных играют критически важную роль в повышении качества и информативности собираемых данных. Обогащение данных контекстной информацией из различных источников позволяет более точно выявлять инциденты безопасности и принимать соответствующие меры по их устранению. Прогностическая аналитика с использованием методов машинного обучения позволяет прогнозировать возможные атаки на основе исторических данных и принимать превентивные меры по их предотвращению. Внедрение таких методов значительно сокращает время реагирования на инциденты и повышает эффективность системы безопасности в целом.

Современные тенденции в развитии SIEM-систем связаны с интеграцией методов искусственного интеллекта и созданием систем нового поколения (AI-SIEM), которые обеспечивают более эффективное выявление угроз, прогнозную аналитику и автоматизированные механизмы реагирования. Таким образом, разработка программного средства для анализа информации о событиях безопасности на основе современных методов искусственного интеллекта является актуальной задачей, решение которой позволит повысить эффективность обеспечения информационной безопасности в условиях растущего количества и сложности киберугроз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка функционирования SIEM-систем на основе комплекса критериев эффективности / М.М. Путято, А.С. Макарян, А.Н. Черкасов, В.А. Кучер // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия: Естественно-математические и технические науки. — 2024. — № 1(336). — С. 36–42. — DOI 10.53598/2410-3225-2024-1-336-36-42. — EDN RUDQZU.
2. Новикова, Е.С. Открытые задачи визуального анализа в системах управления информационной безопасностью / Е.С. Новикова, И.В. Котенко // Информационно-управляющие системы. — 2019. — № 2(99). — С. 57–67. — DOI 10.31799/1684-8853-2019-2-57-67. — EDN LZFXZE.
3. Основы информационной безопасности в МЧС России: Учебник / Р.Ш. Хабибулин, А.Н. Прокопенко, П.Н. Жукова [и др.]. — Москва: Академии ГПС МЧС России, 2023. — 649 с. — EDN DWSUOY.
4. Агапов, Д.К. Алгоритмы сбора и обработки данных в системах информационной безопасности / Д.К. Агапов // International Journal of Open Information Technologies. — 2023. — Т. 11, № 9. — С. 50–58. — EDN IOZMKV.
5. Кириллов, В.А. Система сбора и корреляции событий (siem) как ядро системы информационной безопасности / В.А. Кириллов, А.Р. Касимова, А.Д. Алехин // Вестник Технологического университета. — 2016. — Т. 19, № 13. — С. 132–134. — EDN WIQQWF.

6. Исследование SIEM-систем на основе анализа механизмов выявления кибератак [Электронный ресурс]. — Режим доступа. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-siem-sistem-na-osnove-analiza-mehanizmov-vyyavleniya-kiberatak> (дата обращения: 12.04.2025).
7. Методы машинного обучения для обнаружения аномалий [Электронный ресурс]. — Режим доступа. — URL: <https://scilead.ru/article/6980-metodi-mashinnogo-obucheniya-dlya-obnaruzheni> (дата обращения: 12.04.2025).
8. Генеративный искусственный интеллект как новая стадия развития технологий [Электронный ресурс]. — Режим доступа. — URL: https://www.semanticscholar.org/paper/Актуальность_исследования_угрозы/0253bd170d95710484da6e2578ddd1607c176eff (дата обращения: 12.04.2025).
9. Современные информационные системы анализа и управления рисками в сфере информационной безопасности / И.С. Глушенко, Е.М. Баранова, А.Н. Баранов, С.Ю. Борзенкова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2021. — № 2. — С. 311–316. — DOI 10.24412/2071-6168-2021-2-311-316. — EDN ATMCEK.
10. Технологии интеллектуального анализа данных [Электронный ресурс]. — Режим доступа. — URL: <https://lanbook.com/catalog/discipline/tehnologii-intellektualnogo-analiza-dannyh/> (дата обращения: 12.04.2025).
11. Современные тенденции в развитии SIEM-систем с использованием искусственного интеллекта [Электронный ресурс]. — Режим доступа. — URL: <https://www.itsec.ru/articles/trendy-informacionnoj-bezopasnosti-i-kak-oni-vliyaют-na-siem> (дата обращения: 12.04.2025).
12. Применение систем искусственного интеллекта в обеспечении защиты информации / А.Ю. Полуян, Е.Н. Целигорова, В.В. Галушка, Н.М. Кодацкий // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2023. — № 8-2. — С. 123–127. — DOI 10.37882/2223-2982.2023.8-2.28. — EDN YUABG.
13. Рыболовлев, Д.А. Классификация современных систем управления инцидентами безопасности / Д.А. Рыболовлев, С.В. Карасев, С.А. Поляков // Вопросы кибербезопасности. — 2018. — № 3(27). — С. 47–53. — DOI 10.21681/2311-3456-2018-3-47-53. — EDN MILVBB.
14. Котенко, И.В. Новое поколение систем мониторинга и управления инцидентами безопасности / И.В. Котенко, И.Б. Саенко, Р.М. Юсупов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2014. — № 3(198). — С. 7–18. — EDN SGSPXT.
15. Мунтян, М.М. Способ интеграции вспомогательного модуля с SIEM-системами / М.М. Мунтян, И.Г. Сидоркина // Вестник Чувашского университета. — 2024. — № 4. — С. 60–74. — DOI 10.47026/1810-1909-2024-4-60-74. — EDN FXNVRM.
16. Хлестова, Д.Р. Анализ актуальности использования SIEM-систем на предприятиях / Д.Р. Хлестова, К.Г. Попов // Символ науки: международный научный журнал. — 2016. — № 7-1(19). — С. 89–91. — EDN WHKOSX.
17. Аминев, В.М. Искусственный интеллект в информационной безопасности / В.М. Аминев, М.В. Питеркина // Успехи в науке и образовании 2024: сборник статей IV Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 05 мая 2024 года. — Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2024. — С. 36–39. — EDN GKWTSR.
18. Котенко, И. Анализ моделей и методик, используемых для атрибуции нарушителей кибербезопасности при реализации целевых атак / И. Котенко, С.С. Хмыров // Вопросы кибербезопасности. — 2022. — № 4(50). — С. 52–79. — DOI 10.21681/2311-3456-2022-4-52-79. — EDN AIULIP.
19. Тренды информационной безопасности и их влияние на SIEM [Электронный ресурс]. — Режим доступа. — URL: <https://www.itsec.ru/articles/trendy-informacionnoj-bezopasnosti-i-kak-oni-vliyaют-na-siem> (дата обращения: 12.04.2025).
20. Шананин, В.А. Применение систем искусственного интеллекта в защите информации / В.А. Шананин // Инновации и инвестиции. — 2022. — № 11. — С. 201–205. — EDN ZNGNYF.
21. Рыболовлев, Д.А. Классификация современных систем управления инцидентами безопасности / Д.А. Рыболовлев, С.В. Карасев, С.А. Поляков // Вопросы кибербезопасности. — 2018. — № 3(27). — С. 47–53. — DOI 10.21681/2311-3456-2018-3-47-53. — EDN MILVBB.
22. Котенко, И.В. Новое поколение систем мониторинга и управления инцидентами безопасности / И.В. Котенко, И.Б. Саенко, Р.М. Юсупов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2014. — № 3(198). — С. 7–18. — EDN SGSPXT.
23. Мунтян, М.М. Способ интеграции вспомогательного модуля с SIEM-системами / М.М. Мунтян, И.Г. Сидоркина // Вестник Чувашского университета. — 2024. — № 4. — С. 60–74. — DOI 10.47026/1810-1909-2024-4-60-74. — EDN FXNVRM.
24. Хлестова, Д.Р. Анализ актуальности использования SIEM-систем на предприятиях / Д.Р. Хлестова, К.Г. Попов // Символ науки: международный научный журнал. — 2016. — № 7-1(19). — С. 89–91. — EDN WHKOSX.

© Русаков Алексей Михайлович (rusakov_a@mirea.ru); Комаров Кирилл Юрьевич (kk7453603@gmail.com);
Корягин Сергей Викторович (dongenealog2003@mail.ru); Корягина Вероника Михайловна (koryagina.v.m@edu.mirea.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УВЕДОМЛЕНИЙ ОБ АВАРИЯХ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ В ВИДЕ TELEGRAM-БОТА С ПОМОЩЬЮ ПЛАТФОРМЫ CAMUNDA

DEVELOPMENT OF A SYSTEM NOTIFYING ABOUT EMERGENCIES AT ENTERPRISES IN THE FORM OF A TELEGRAM BOT USING THE CAMUNDA PLATFORM

**Yu. Savelieva
N. Kulagina
V. Vaulin
A. Luk'yanov**

Summary. Most modern enterprises introduce into production and utilize advanced automation solutions at various stages of the product lifecycle. A wide range of software is used for management systems, ranging from tools for individual components of technological processes and equipment to complex software developed for managing technological processes, production, and entire enterprises. These systems also provide data management, including information transfer and delivery both within the company and externally, depending on the need. Some existing systems for continuous monitoring and control of industrial equipment allow data management not only through software itself, local networks, and the Internet, but also via mobile devices, such as SMS notifications. However, this method is not always convenient for the staff of the enterprise, who often prefer notifications through messengers or working chats that deliver specific messages with relevant information. To notify about accidents related to industrial equipment, a Telegram-bot was developed using the Camunda software platform. The algorithm of the system notifying about emergencies at enterprises presented in the work can be used in various areas, including non-production areas, to generate notifications.

Keywords: automation engineering solutions, industrial equipment, alert systems, notification systems, Camunda, Telegram bot.

Савельева Юлия Олеговна

канд. техн. наук, филиал ФГБОУ ВО

Самарского государственного технического
университета в г. Сызрани

Savelieva_yu_ol@mail.ru

Кулагина Надежда Алексеевна

филиал ФГБОУ ВО Самарского государственного
технического университета в г. Сызрани

Ваулин Владимир Иванович

канд. пед. наук, филиал ФГБОУ ВО

Самарского государственного технического
университета в г. Сызрани

Лукьянов Александр Александрович

филиал ФГБОУ ВО Самарского государственного
технического университета в г. Сызрани

Аннотация. Большинство современных предприятий внедряют и используют передовые решения в сфере автоматизации на отдельных или всех этапах жизненного цикла продукта. Применяется различное программное обеспечение для систем управления: от программных сред для отдельных узлов технологического процесса и оборудования до сложных программных комплексов для управления технологическими процессами, производствами и предприятиями, обеспечивающих также управление данными, включая передачу и предоставление информации как внутри компании, так и вне ее. Некоторые существующие системы для непрерывного мониторинга и контроля промышленного оборудования позволяют управлять данными не только посредством самого программного обеспечения, по локальной сети, сети Интернет, но и также с помощью мобильных устройств — SMS-оповещения. Однако, подобный метод для персонала организации не всегда является удобным: предпочтение отдается уведомлениям через мессенджеры или оперативные чаты, с получением определенных сообщений с конкретными сведениями. Для уведомления об авариях промышленного оборудования разработан бот Telegram с использованием программной платформы Camunda. Приведенный в работе алгоритм системы уведомления об авариях может быть использован в различных, в том числе не производственных, сферах, для формирования уведомлений.

Ключевые слова: инженеринговые решения автоматизации, промышленное оборудование, системы аварийного оповещения, системы уведомлений, Camunda, бот Telegram.

Введение

Системы непрерывного мониторинга и контроля промышленного оборудования позволяют в реальном времени фиксировать состояние оборудования, идентифицировать причины простоя [1–2]. Рассматривается система сбора данных о работе обо-

рудования с устройством числового программного управления (УЧПУ), контроллеров станка, станочных терминалов. Мониторинг осуществляется посредством программного обеспечения, интернет-сервиса (web-диспетчер), коллективного пульта мониторинга, а также предусмотрен встроенный механизм СМС-оповещения персонала с использованием специального модуля, ос-

Станок	Событие	Начало	Окончание	Длительность
(ТЕСТ) МЕСМILL/ 411- 560/ ц.5/Расточ. станок	тест тэгов	17.02.2025 13:23:10	17.02.2025 13:23:11	00:00:01

Рис. 1. Модуль «Контроль событий»

нащенного SIM-картой. Модуль, в котором происходит сохранение записей об авариях промышленного оборудования, подключенного к системе непрерывного мониторинга, называется «Контроль событий». «Контроль событий» представляет собой таблицу, в которую записываются события, формируемые системой мониторинга промышленного оборудования (пример события, показан на рисунке 1).

По событиям в системе происходит рассылка оповещений для ответственных работников предприятия о простое оборудования и проблемах при производстве продукции. Рассылка оповещений происходит посредством отправки СМС-оповещений, пример содержимого СМС-оповещения представлено на рисунке 2.

На станке (ТЕСТ) Расточной
МЕСМILL (411-560) выставили
наладку

Рис. 2. Пример текста СМС-оповещения

Однако, механизм настройки рассылки подобных уведомлений ограничен и не обеспечивает необходимую гибкость, не позволяя выводить важную информацию, в особенности для механиков и ремонтников, например, протоколы подключения станка к системе мониторинга. Кроме того, для современных пользователей требования удобства больше отвечают уведомления через мессенджеры или оперативные чаты [3–4]. Также необходимо отметить финансовый момент — отправка СМС-оповещений происходит за счет GSM модуля и за каждую СМС взимается плата в соответствии с установленным тарифом от поставщика мобильных услуг. В связи с этим, возникает необходимость разработки инструмента с более гибкими настройками, для этой цели выбрана платформа Camunda.

Camunda — открытая платформа, представляющая собой набор библиотек на языке программирования Java, позволяющая создавать схемы бизнес-процессов, выполнять описанные процессы, создавать цифровой продукт по требованиям заказчика; используется для автоматизации бизнес-процессов [5–9]. В качестве источника данных для платформы Camunda используется база данных рассматриваемой текущей системы мониторинга и контроля промышленного оборудования предприятия (далее DataBase). Для взаимодействия DataBase с платформой предусмотрено использование дополни-

тельного плагина и модуля, позволяющих решать задачи по обслуживанию и администрированию.

Постановка задачи. Разработка системы уведомлений об авариях промышленного оборудования в виде Telegram-бота на базе программной платформы Camunda.

Методология

Особенности установки и настройки компонентов для работы Camunda. Для выполнения поставленной в работе задачи необходимо проделать подготовительные процедуры:

- 1) Установка Node.js и/или обновления до актуальной версии (в данной работе использована версия 18.20.3). Node.js — это среда выполнения JavaScript для создания серверных приложений, используются для запуска отдельных скриптов и приложений на JavaScript [10–13]. Node.js выступает в качестве базы для работы Camunda.
- 2) Установка и настройка плагина Camunda. Для установки плагина Camunda и прописывания его адреса в файлах конфигурации, копируется папка плагина по следующему пути: .../Industry/Server/Plugins, в конфигурационном файле appsetting.json необходимо раскомментировать свойства Plugins и поменять настройки:

```

"Plugins": {
  "CamundaPlugin": {
    "CamundaUrl": "http://localhost:9090",
    "SqlQueryOptions": {
      "ConnectionStrings": {
        "Default": "Provider=MsSqlServer;
        Server=localhost,1433;Database=
        DataBase;User ID=User;Password=User;"
      }
    },
    "HttpRequestOptions": {
      "Templates": {
        "MdcRest": {
          "Url": "http://localhost:9000/
IndustryRestManagement/",
          "Headers": {
            "Authorization": "Basic -----" //
указать пароль base64
          }
        }
      }
    }
  }
}

```

Создание и настройка бота Telegram. Для создания бота Telegram, через который будут отправляться сообщения, необходимо [14-18]:

1. Переход в диалог с инструментом для разработки чатов — <https://telegram.me/BotFather>.
2. Кнопка «Start» или ввод в диалоге команды /start.
3. Ввод команды /newbot, для создания нового бота.
4. Указание названия, которое будет отображаться в чате (ник бота) в списке контактов. Может быть любым, даже дублировать уже существующее.
5. Указание системного имени, которое будет ником после знака @. Обязательно должно быть уникальным, если имя уже занято, всплывет подсказка: «Sorry, this username is already taken. Please try something different».
6. После создания бота в чате получается токен. Токен бота Telegram — это индивидуальный цифро-буквенный код, который хранится в тайне для избежания получения доступа и использования злоумышленниками. Этот токен сохраняется, так как он используется для дальнейшей интеграции.

Написание и установка внешнего обработчика. Ниже приведен код (скрипт) внешнего обработчика на JavaScript:

```
import { Client, logger } from "camunda-external-task-client-js";
import { Variables } from "camunda-external-task-client-js";
import fetch from "node-fetch";
const config = { baseUrl: "http://localhost:9090/engine-rest",
use: logger }; // Конфигурация клиента Camunda
const client = new Client(config); // Создание экземпляра клиента
// Подписка на топик 'SendMessageTelegram'
client.subscribe("SendMessageTelegram", async function({
task, taskService })
{
    // Получение переменных из процесса Camunda
    const cDeptName = task.variables.get("deptname");
    const cTextMessage = task.variables.get("textmessage");
    // Асинхронная функция для отправки запроса и получения ответа
    async function answerOk (url) {
```

```
    let response = await fetch(url);
    let data = await response.json();
    return JSON.parse(JSON.stringify(data).replace(/
/g, " ")).ok;
}
// Отправка сообщения в Telegram и получение результата
let answer = await answerOk ('https://api.telegram.org/bot bot556...t0vR/sendMessage?chat_id=12345&text='+cDeptName+'%0A'+cTextMessage);
// Проверка результата и завершение задачи
if (answer == true) {
    await taskService.complete(task); //complete task
}
else {
    let answer1 = await answerOk ('https://api.telegram.org/bot556...t0vR/sendMessage?chat_id=67890&text='+cDeptName+'%0A'+cTextMessage)
    await taskService.complete(task);
}
});
```

Этот код подписывается на задачи с топиком «SendMessageTelegram» в процессе Camunda и отправляет сообщения в чаты Telegram на основе полученных переменных из процесса. Топик — это название блока очереди в Camunda. В URL ссылке вводится токен бота Telegram. Этот код сохраняется в файле с именем SendMessageTelegram.js и помещается в папку, откуда обработчик будет работать.

Запуск скрипта производится в Node.js command prompt, последовательным вводом следующих команд:

- cd {путь к папке с внешним обработчиком}
- npm install -s camunda-external-task-client-js
- npm install node-fetch
- node .\TEST.js

В выбранной папке появляется несколько файлов с установленными модулями, библиотеками и конфигурационными файлами (рисунок 3).

Разработка диаграммы в Camunda Modeler. В качестве источника данных используется DataBase. Отбор

Имя	Дата изменения	Тип	Размер
 node_modules	07.05.2024 9:47	Папка с файлами	
 package.json	07.05.2024 9:47	Файл "JSON"	1 КБ
 package-lock.json	07.05.2024 9:47	Файл "JSON"	10 КБ
 README.txt	20.06.2024 10:13	Текстовый докум...	1 КБ
 SendMessageTelegram.js	09.07.2024 9:13	файл JavaScript	2 КБ

Рис. 3. Установленные модули

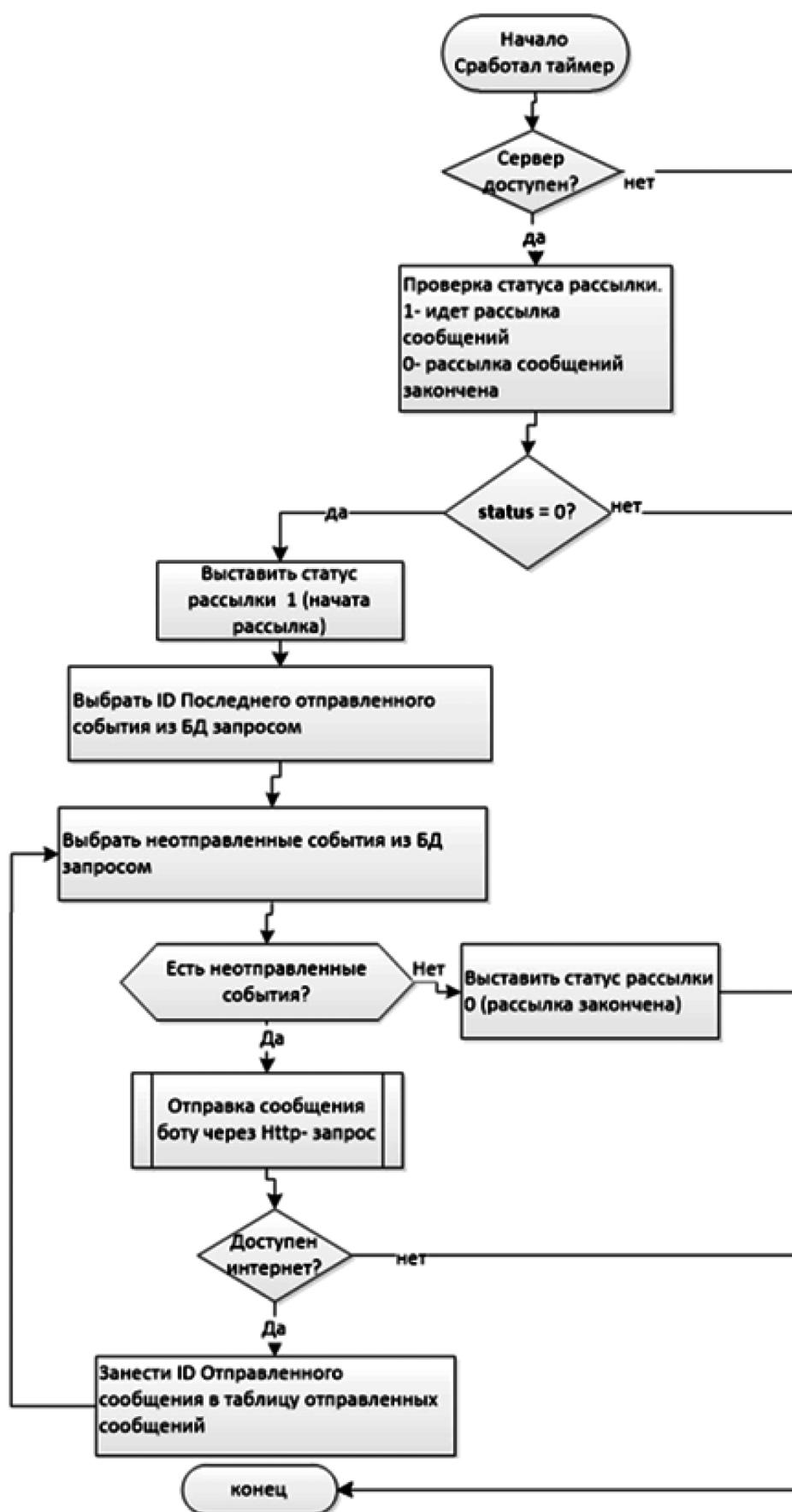


Рис. 4. Алгоритм уведомлений

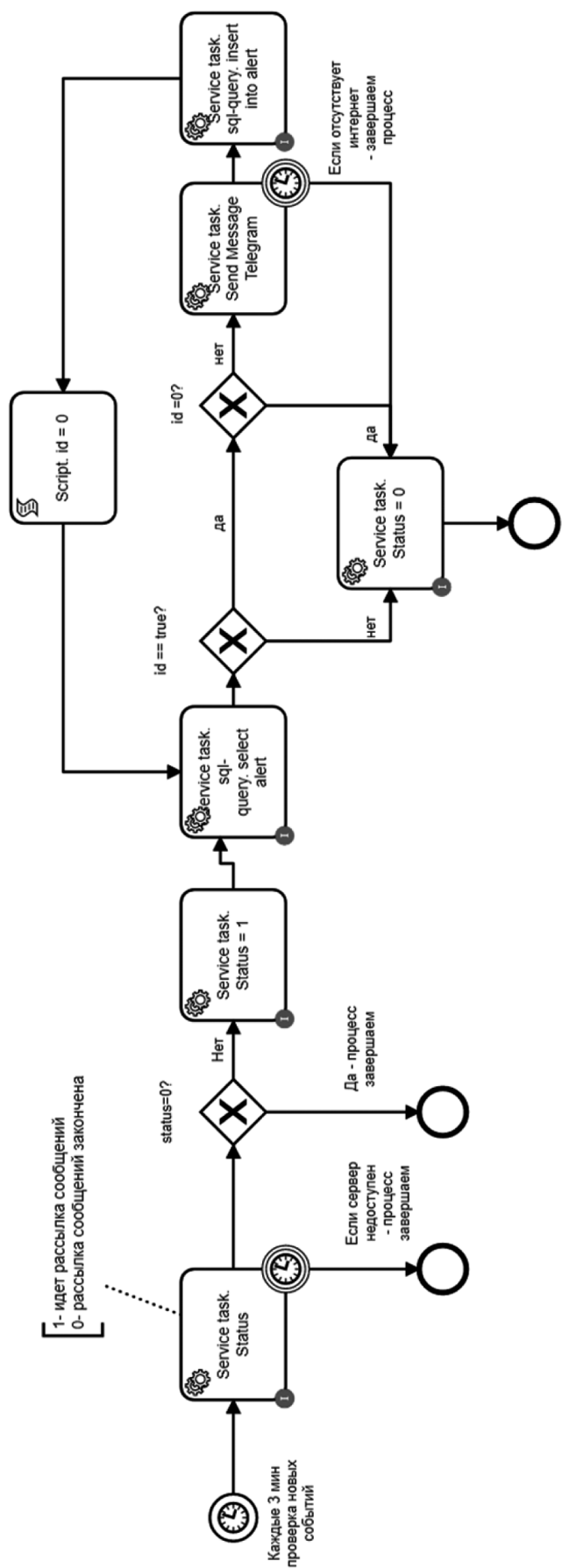


Рис. 5. Диаграмма системы уведомлений

необходимых уведомлений ведется по следующим условиям:

- Тип события «Авария».
- Дата возникновения — последние сутки (всё, что больше суток, считается неактуальным).

Для записи статуса рассылки и хранения последнего отправленного сообщения создаются отдельные таблицы в базе. Такое решение обусловлено поведением Camunda, после завершения процесса все переменные удаляются и хранить долгосрочные данные в них не получится.

Разработка системы осуществляется в Camunda Modeler. В построении диаграммы используются следующие компоненты:

- Start event и End event — определяют, где начинается и заканчивается процесс. В диаграмме требуется по крайней мере одно событие начала для создания экземпляра процесса.
- Gateway — используется для моделирования решения в процессе. Когда выполнение достигает этого шлюза, все исходящие потоки последовательности оцениваются в том порядке, в котором они были определены. Поток последовательности, условие которого оценивается как «истина», выбирается для продолжения процесса.
- Timer — блок, в котором задается время запуска события;
- Service task — используется для вызова служб. В блоки Service task в поле «SQL команда» прописываются sql-запросы к базе системы DataBase (АИС Диспетчера). Строку подключения к базе данных можно оставить пустой, т.к. имя шаблона автоматически подтянется из конфигурационного файла.
- Script task — это автоматизированная деятельность. Когда выполнение процесса достигает задачи скрипта, выполняется соответствующий сценарий.

Разработка алгоритма системы уведомлений. Алгоритм системы уведомления приведен на рисунке 4.

На основе приведенного алгоритма проектируется система уведомлений.

Результаты

На рисунке 5 показана спроектированная диаграмма системы уведомлений.

После проектирования диаграмма публикуется в Camunda Cockpit с помощью функции «Deploy diagram» для начала работы (рисунок 6).

Deploy diagram

Deployment name

Telegram-рассылка сообщений об аварии v

Tenant ID

Optional

REST endpoint

http://localhost:9090/engine-rest

Include additional files



Deploy

Рис. 6. Публикация диаграммы

После публикации необходимо перейти в Camunda Cockpit по адресу <http://localhost:9090/>, логин и пароль здесь по умолчанию Admin и Admin (рисунок 7).

CAMUNDA

Cockpit

Username

Password

Log in

Рис. 7. Страница авторизации

Далее открывается панель управления процессов (рисунок 8).

Данная панель позволяет видеть развернутые определения процессов. Необходимо выбрать нужный развернутый процесс.

Представление экземпляра процесса приводится на рисунке 9.

Это означает, что процесс уже начал работать.

Обсуждение

В качестве системы мониторинга и контроля промышленного оборудования рассматривалась система АИС «Диспетчер». Это универсальная российская система, разработчиком программного решения являет-

Camunda Cockpit

Processes

Decisions

Human Tasks

More ▾

Admin Admin

⌵

Dashboard ▸ Processes

5 process definitions deployed

List

Previews

State	Incidents ▾	Running Instances ▾	Name ▾	Tenant ID ▾
✓	0	0	telegram рассылка сообщений об аварии v4	
✓	0	2	telegram рассылка сообщений об аварии v2	
✓	0	1	telegram рассылка сообщений об аварии	
✓	0	0	send_mes_teleg_admin	
✓	0	0	Process_1pbyy9x	

Рис. 8. Список процессов

Camunda Cockpit Processes Decisions Human Tasks More ▾					Admin Admin	
Dashboard » Processes » telegram рассылка сообщений об аварии v4 : Runtime						
Definition Version: 3 ▾ Version Tag: 2.0 Definition ID: telegram_alert_error_v4:3:6b3c0b6d... Definition Key: telegram_alert_error_v4 Definition Name: telegram рассылка сообщений об ав... History Time To Live: 1 day ✕ Tenant ID: null Deployment ID: 68640c3b-3a95-11ef-8735-00155d... Instances Running: • current version: 0 • all versions: 0	Activity Instance Statistics: on ● Process Instances Incidents Called Process Definitions Job Definitions Add criteria No process instances matched by current filter.					

Рис. 9. Список процессов

ся группа компаний «Цифра», позволяющая контролировать работу любого оборудования и рабочих мест, обеспечивающая объективными данными все системы управления предприятием [19]. Разработчиками АИС «Диспетчер» для взаимодействия с платформой Camunda были разработаны дополнительные плагин и модуль. Схема взаимодействия между пользовательским приложением АИС «Диспетчер» и платформой показана на рисунке 10 [20].

Принцип работы платформы Camunda заключается в том, что она запускается как отдельное приложение,

куда интегрируются процессорные приложения в виде war-файлов. Несмотря на то, что язык, на котором разработана платформа Camunda, это Java, для работы может быть использован любой язык программирования.

В данной работе была использована версия Node.js 18.20.3, в более ранних версиях Node.js может не сформироваться конфигурационный файл package.json. Если такое произошло, необходимо создать его самостоятельно и вписать в него следующий текст:

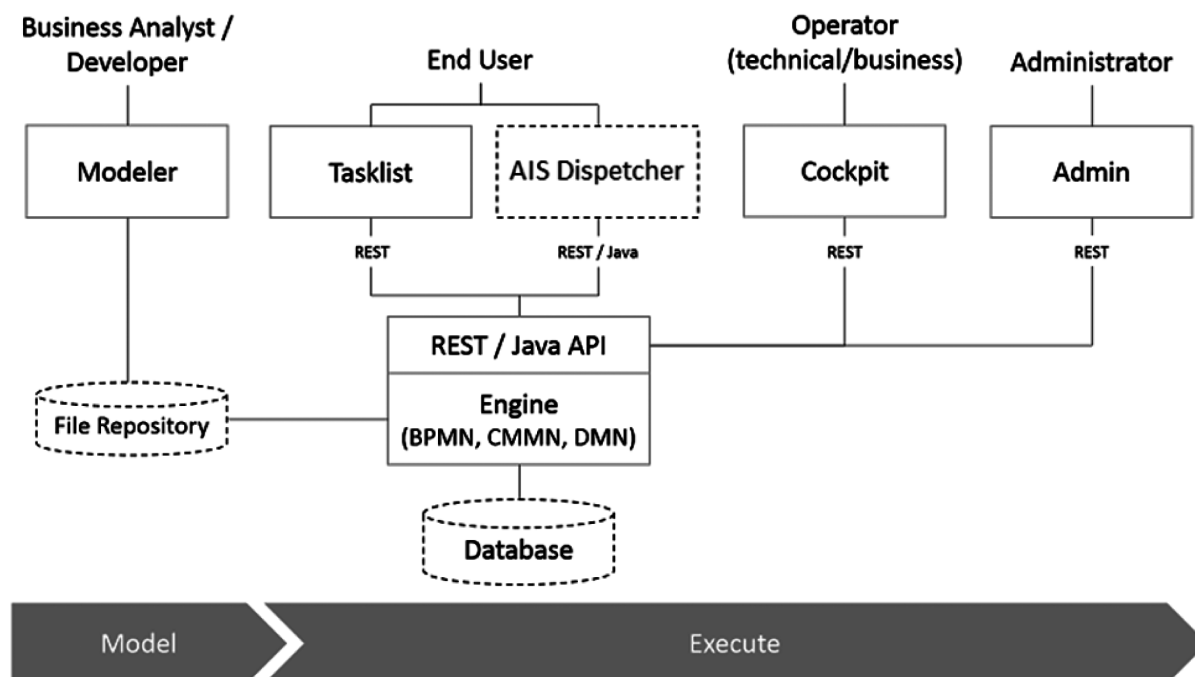


Рис. 10. Схема взаимодействия компонентов Camunda

```
{
  "dependencies": {
    "camunda-external-task-client-js": "^3.1.0",
    "node-fetch": "^3.3.2"
  },
  «type»: «module»
}
```

В итоге, в консоли отображается сообщение (рисунок 11).

Рис. 11. Подписка на топик

Данное сообщение в консоли о том, что внешний обработчик успешно подписался на топик Camunda.

Выводы

Был проведен анализ возможностей систем непрерывного мониторинга и контроля промышленного оборудования. Произведены необходимые начальные настройки платформы Camunda, получающей информацию из базы данных имеющейся на предприятии системы мониторинга оборудования, для реализации разработки системы уведомлений. Построен алгоритм работы системы уведомлений на базе платформы Camunda, осуществлена разработка системы уведомлений об авариях на предприятиях в виде Telegram-бота. Полученная эффективность работы системы уведомлений об авариях имеет важное значение для оперативного реагирования ремонтных служб.

ЛИТЕРАТУРА

- Кузнецов А.Е., Смирнова И.Г. Разработка автоматизированной информационной системы «Учёт заявок» / Экономика и социум, 2021. — №5(84), ч.2. — С.1202–1208
- Иванов Г., Селезнев Д., Каадзе А.Г. Автоматизация бизнеса: программы, инструменты и технологии / Статья на сайте газеты «Комсомольская правда», 2023 [Электронный ресурс] // URL: <https://www.kp.ru/guide/avtomatizatsiya-biznesa.html>
- Березин Е. Цифровая трансформация цементного завода (ч. 4): автоматические личные кабинеты и чат-боты / статья на сайте Хабр (бывший Хабрахабр) — русскоязычном веб-сайте в формате системы тематических коллективных блогов, 2021 [Электронный ресурс] // URL: <https://habr.com/ru/articles/553174/>
- Нигматуллин К.Р., Забродин А. В. Исследование и разработка чат-бота для оптимизации поддержки технологов системы «График исполнительного движения» в РЖД: выбор и обоснование платформы / Интеллектуальные технологии на транспорте, 2024. — № 1 (37). — С.61–72.
- Camunda — описание, примеры и инструкции на русском [Электронный ресурс] // URL: <https://camundarus.ru/>
- Автоматизация бизнес-процессов на open-source-технологиях (Camunda) / Информация на сайте компании ЛАНИТ — Би Пи Эм — Российской ИТ-компании, эксперта в области анализа, интеллектуальной автоматизации и трансформации корпоративных бизнес-процессов [Электронный ресурс] // URL: <https://lanitbpm.ru/camunda>

7. Camunda: тестируем модели процессов / статья компании SimbirSoft — компании, предоставляющей услуги по разработке и тестированию программных продуктов на сайте Хабр (бывший Хабрахабр) — русскоязычном веб-сайте в формате системы тематических коллективных блогов, 2022 [Электронный ресурс] // URL: <https://habr.com/ru/companies/simbirsoft/articles/657697/>
8. Dobby Guides Camunda. Часть 1/3 / статья на сайте telega.ph — инструменте для создания блогов и статей, 2023 [Электронный ресурс] // URL: <https://telega.ph/Camunda-CHast-13-09-05?ysclid=m3lrxi4lvx556476583>
9. Котов Д. Первый проект на Camunda: добавляем формы и автоматизацию / статья в блоге архитектора бизнес-процессов в Тинькофф [Электронный ресурс] // URL: <https://bpmn2.ru/blog/proekt-na-camunda-dobavlayem-formi-i-avtomatizaciю>
10. Трунин В. Путь программиста T-SQL / Самоучитель по языку Transact-SQL. Основы программирования для начинающих разработчиков. — Издательство: Info-Comp, 2020. — 204 с.
11. Официальная документация по работе с MSSQL / Информация на сайте Microsoft Learn — средстве для освоения продуктов и служб от разработчиков Microsoft, 2025 [Электронный ресурс] // URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/sql/relational-databases/lesson-1-connecting-to-the-database-engine?view=sql-server-ver16>
12. Руководство по Node.js, часть 1: общие сведения и начало работы / перевод статьи Flavio Copes в блоге компании RUVDS.com, 2018 [Электронный ресурс] // URL: <https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/422893/>
13. Документация по модулю Node Fetch. Легкий модуль, который добавляет API Fetch в Node.js [Электронный ресурс] // URL: <https://www.npmjs.com/package/node-fetch>
14. Хватков Г. Боты в Telegram: какими они бывают, как работают и как сделать своего / статья на сайте Skillbox — российской образовательной платформы с онлайн-курсами, 2022 [Электронный ресурс] // URL: <https://skillbox.ru/media/marketing/boty-v-telegram-kakimi-oni-byvayut-kak-rabotayut-i-kak-sdelat-svoego/>
15. Как создать бота в Telegram: большая инструкция / статья на сайте Skillfactory — российской онлайн-школы IT-профессий, 2024 [Электронный ресурс] // URL: <https://blog.skillfactory.ru/kak-sozdat-bota-v-telegram/>
16. Telegram Bot API / Официальная документация Telegram API для управления ботом [Электронный ресурс] // URL: <https://core.telegram.org/bots/api#formatting-options>
17. From BotFather to 'Hello World' / Официальное руководство по созданию и программированию Telegram-бота [Электронный ресурс] // URL: <https://core.telegram.org/bots/tutorial>
18. Как создать чат-бота в Telegram / Информация на сайте Sber Developer — сайте технологий и отраслевых решений от Сбера для развития малого и среднего бизнеса, 2024 [Электронный ресурс] // URL: <https://developers.sber.ru/help/salutebot/telegram-integration>
19. Официальный сайт группы компаний «Цифра», разрабатывающей и внедряющей промышленные цифровые решения на базе собственной платформы, предоставляющей доступ к среде разработки платформенных приложений, развивающей индустрию роботизированного промышленного транспорта в горнодобывающей, нефтегазовой, химической и машиностроительных отраслях [Электронный ресурс] // URL: <https://www.zyfra.com/ru/about/>
20. Диспетчер — сайт многофункционального программного комплекса для оперативного контроля и повышения эффективности работы промышленных предприятий [Электронный ресурс] // URL: <https://intechology.ru/>

© Савельева Юлия Олеговна (Savelieva_yu_ol@mail.ru); Кулагина Надежда Алексеевна; Ваулин Владимир Иванович; Лукьянов Александр Александрович
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ХРАНЕНИЯ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ КЛЮЧЕЙ НА ОСНОВЕ СХЕМЫ ШАРДИРОВАНИЯ

Салихов Максим Русланович

Аспирант, Национальный исследовательский
университет ИТМО
ic3cr3amsndwtch@yandex.ru

DEVELOPMENT OF PRACTICAL RECOMMENDATIONS FOR A DISTRIBUTED CRYPTOGRAPHIC KEY STORAGE SYSTEM BASED ON SHARDING SCHEME

M. Salikhov

Summary. This article is dedicated to the development of practical recommendations for building a secure distributed cryptographic key storage system. A comparative assessment of resource consumption and system performance was conducted in relation to existing MPC solutions such as tss-lib, Partisia, and ZenGo X. The results confirm the practical applicability of the proposed recommendations in scenarios such as Web3, corporate key management, and digital legacy. The study offers valuable guidance for developers aiming to implement secure and scalable key storage solutions in the context of ever-increasing requirements for digital asset protection and cryptographic resilience. The paper also presents an architecture for distributed key storage with time-binding and integrity verification mechanisms, which is particularly relevant for ephemeral keys. The proposed model implements a flexible multi-scenario key recovery logic based on Shamir's Secret Sharing (SSS) and ensures that access is impossible without user participation.

Keywords: distributed key storage, sharding, ephemeral keys, cryptographic security, key management.

Аннотация. Настоящая статья посвящена разработке практических рекомендаций по созданию безопасной системы распределённого хранения криптографических ключей. Проведена сравнительная оценка ресурсоёмкости и скорости работы системы по сравнению с существующими решениями MPC, такими как tss-lib, Partisia и ZenGo X. Результаты подтверждают возможность практического применения разработанных рекомендаций в сценариях Web3, корпоративного управления и цифрового наследия. Результаты исследования предоставляют ценные ориентиры для разработчиков, стремящихся внедрять безопасные и масштабируемые решения хранения ключей в условиях постоянно возрастающих требований к защите цифровых активов и криптографической устойчивости. В статье также рассмотрена архитектура распределённого хранения ключей с временной привязкой и проверкой их целостности, что особенно актуально для эфемерных ключей. Предложенная модель реализует гибкую многосценарную логику восстановления ключей с помощью пороговой схемы Шамира (SSS) и гарантирует, что доступ невозможен без участия пользователя.

Ключевые слова: распределенное хранение ключей, шардирование, эфемерные ключи, криптографическая безопасность, управление ключами.

Введение

Безопасность хранения криптографических ключей является одной из ключевых задач при проектировании распределённых и децентрализованных систем. Особое внимание в современных архитектурах уделяется **эфемерным ключам**, применяемым в сессионных протоколах, системах обмена сообщениями и одноразовых схемах аутентификации. Их короткий жизненный цикл и динамическая генерация создают дополнительные требования к безопасности хранения и совместного управления такими ключами в распределённой среде.

Для решения этой задачи всё чаще применяются технологии **безопасных многопартийных вычислений** (Secure Multi-Party Computation, MPC), позволяющие

участникам системы выполнять совместные вычисления над секретными данными без необходимости их раскрытия [1, 2]. В контексте хранения ключей, MPC используется для генерации, разделения, восстановления и управления криптографическим материалом без наличия единой точки отказа. Однако большинство существующих решений сосредоточены на **долговременных ключах** или использовании **больших вычислительных ресурсов**, что ограничивает их применимость в практических сценариях с эфемерными ключами и ограниченными устройствами (например, IoT, мобильные клиенты, лёгкие кошельки).

Среди наиболее известных реализаций MPC можно выделить:

- **tss-lib** от Binance [3], предоставляющую реализацию распределённой подписи (ECDSA/EdDSA)

и схему пороговой генерации ключей, широко используемую в криптокошельках и биржах;

- **multi-party-ecdsa** (ZenGo X) [4], реализующую надёжный и оптимизированный протокол MPC-подписей без необходимости единой доверенной стороны;
- **MPyC** — академический фреймворк на Python, предназначенный для реализации и тестирования защищённых вычислений с поддержкой широкого класса арифметик [5];
- **Partisia MPC** [6] — промышленная платформа, объединяющая методы разделения секрета и доказательства с нулевым разглашением, применяемая в блокчейн-инфраструктурах и финансовых сервисах.

Тем не менее, существующие библиотеки редко предлагают **практические рекомендации** по проектированию систем, адаптированных именно к эфемерным ключам — с учётом их временной природы, необходимости быстрого распределения и восстановления, а также устойчивости к частичным сбоям и компрометации узлов. В качестве перспективного решения предлагается использовать **шардирование эфемерных ключей**, при котором ключ разбивается на части (шарды), распределяется между участниками, и может быть восстановлен только при наличии кворума.

Для выработки практических рекомендаций по построению системы распределённого хранения эфемерных криптографических ключей на основе шардирования был проведён анализ существующих решений в области безопасных многопартийных вычислений (MPC).

В последние годы технология Secure Multi-Party Computation (MPC) стала ключевым инструментом для безопасного управления цифровыми активами. В данном обзоре анализируются четыре перспективных MPC-решения: ZenGo X, TSS-lib, MPyC и Partisia MPC, с точки зрения их архитектуры, производительности и применимости для задач распределённого хранения ключей.

ZenGo X

Решение ZenGo X представляет собой некастодиальный криптокошелек, реализующий двухстороннюю схему MPC-ECDSA на основе протокола Gennaro-Goldfeder. Система отличается:

- Использованием языка Rust для обеспечения безопасности и производительности
- Оптимизацией для мобильных устройств с ограниченными ресурсами
- Реализацией защиты от активных атак типа «злоумышленник в середине»

Основное ограничение — поддержка только схемы 2-из-2, что снижает отказоустойчивость по сравнению с пороговыми системами.

TSS-lib (Binance)

Библиотека TSS-lib от Binance реализует пороговые схемы ECDSA (GG18, GG20) и EdDSA. Ключевые особенности:

- Поддержка гибких пороговых схем (t-of-n) [7]
- Интеграция с аппаратными модулями безопасности
- Высокая производительность (до 500 TPS) [8]

Однако решение требует доверенной настройки и обладает высокими требованиями к ресурсам (до 300 МБ памяти на узел).

MPyC

Универсальная MPC-библиотека MPyC на Python предоставляет:

- Гибкий API для исследовательских задач
- Поддержку различных криптографических протоколов
- Простоту интеграции с научными вычислениями

Главный недостаток — крайне низкая производительность (1–10 TPS), что делает систему непригодной для промышленного использования [9].

Partisia MPC

Децентрализованная платформа Partisia MPC [10] сочетает:

- BFT-консенсус для обеспечения отказоустойчивости
- Поддержку приватных смарт-контрактов
- Географически распределённую архитектуру

Однако система имеет существенные накладные расходы (20–100 TPS) и высокие требования к инфраструктуре.

Анализ проводился по ключевым критериям, представляющим интерес для реализации распределённой системы хранения эфемерных ключей: **время выполнения, потребление памяти, уровень безопасности, сфера применения и скорость** (включающая задержку на выполнение базовых криптографических операций). Показатели скорости и памяти оценивались по опубликованным результатам и документации проектов, а также по эмпирическим тестам из открытых исследований.

Материалы и методы

В рамках настоящего исследования была проанализирована и уточнена ранее разработанная модель рас-

пределенной системы хранения закрытых ключей криптокошельков, представленная в работе [11]. Основной особенностью модели является использование схемы криптографического шардирования на базе **порогового разделения секрета** (Shamir Secret Sharing, SSS), при которой исходный ключ делится на несколько долей с порогом восстановления.

Система основана на **разделении закрытого или мастер-ключа** (или эфемерного ключа) на доли с использованием **схемы Шамира**. Эти доли распределяются между доверенными устройствами и субъектами (V1–V6). Для генерации эфемерных ключей используется **HKDF** (HMAC-based Key Derivation Function). В системе реализуется механизм **временного ограничения** действия ключей и их **проверки по метке времени**.

Ключевые особенности данной системы:

- Возможность **восстановления ключа** из разных комбинаций долей (например, V1+V6, V2+V3 и т.д.).
- Исключение восстановления без участия пользователя (**V4+V5 не дают доступа**).
- Эфемерные ключи генерируются заново, если **истёк срок действия**, что улучшает защиту от длительной компрометации.

Результаты

Анализ предложенной модели распределённого хранения закрытых ключей криптокошельков, основанной на пороговой схеме Шамира и многосценарной логике восстановления, позволяют предложить конкретные рекомендации для практической реализации и применения.

Практические рекомендации:

- Архитектура системы:
- Использовать схему Шамира с параметрами $N=10N=10$, $T=4T=4$, что обеспечивает гибкость и разнообразие сценариев восстановления.
- Распределять доли между:
 - V1 — мобильное устройство,
 - V2 — аппаратный кошелек,
 - V3 — офлайн-носитель (бумажный/QR-код),
 - V4/V5 — доверенные лица или сервисы,
 - V6 — облачное зашифрованное хранилище.

Алгоритмические и криптографические меры:

- Каждая доля должна быть зашифрована **до хранения** с использованием **AES-256** или **RSA-2048**.
- Использовать **HKDF** для генерации эфемерных ключей, включая метку времени и уникальный salt.
- Применять **двухфакторную аутентификацию** при обращении к облаку и к доверенным лицам.

Поведенческие и пользовательские меры:

- Рекомендуется **периодически проверять целостность и доступность долей**.
- Обеспечить механизм «тренировочного восстановления» — для предотвращения потерь в случае паники или утери устройств.
- При реализации восстановления через V4+V5 обязательно использовать **усиленные меры верификации** (биометрия, видеозвонок, физическое присутствие).

Обеспечение целостности и доступности долей шардированного ключа

Целостность долей

Целостность доли означает, что она не была изменена, повреждена или подменена с момента создания.

Методы обеспечения:

1. **Хэш-суммы долей:** При генерации каждой доли одновременно вычисляется её криптографическая хэш-сумма (например, SHA-256), которая сохраняется в локальном хранилище пользователя или в защищённой базе метаданных (например, JSON-файл с контрольными суммами).
 - Формат: {share_id: V1, hash: SHA256(V1), timestamp: ..., location: ...}
 - Проверка: при восстановлении доли, повторно вычисляется её хэш и сравнивается с оригинальной контрольной суммой.
2. **Цифровая подпись долей:** Если доля передаётся или хранится у внешнего субъекта (V4, V5, V6), она подписывается закрытым ключом создателя (или администратора системы). Это позволяет проверить её подлинность и неизменность.
 - Используемые алгоритмы: RSA, Ed25519
 - Проверка: при загрузке доли — верификация подписи с использованием публичного ключа.
3. **Меркле-деревья для хранения в облаке:** Если доли или их шифротексты хранятся в распределённом или облачном хранилище, для обеспечения целостности можно использовать Меркле-дерево. Корень дерева хранится у пользователя или в независимом реестре (например, в смарт-контракте).

Доступность долей

Доступность — это возможность физически и логически получить доступ к доле при необходимости восстановления ключа.

Методы обеспечения:

1. **Периодическая проверка доступа по расписанию (heartbeat-проверка):** Пользовательское

приложение может автоматически проверять наличие подключённых устройств или доступность долей на облаке/носителях (например, через ping API к GDrive или проверку чтения файла с QR-доли).

- Пример: ежемесячная проверка успешной расшифровки и верификации V6 с облака.
 - В случае сбоя — отправка уведомления пользователю о необходимости регенерации доли.
2. **Чек-лист с ручным подтверждением** (для офлайн-хранилищ V3):
- Пользователь получает напоминание, чтобы вручную проверить сохранность физического носителя и подтвердить это через интерфейс приложения (например, «да/нет, доля найдена»).
 - Можно привязать к календарным событиям или использовать push-уведомления.
3. **Механизм самопроверки при восстановлении:** В процессе тестового восстановления ключа (или одной из долей) приложение предлагает пользователю пройти процедуру частичного восстановления (например, собрать ключ из V1 + V6 и сравнить результат с хэшем master-key).

Для повышения надёжности рекомендуется использовать **журнал событий** (audit log), фиксирующий успешные и неудачные обращения к долям, включая дату, IP и источник.

Протоколы периодического контроля (health-check) можно реализовать на базе Python-скрипта или встроенного модуля в мобильное приложение.

Таким образом, обеспечение целостности и доступности долей может быть автоматизировано и частично делегировано клиентскому программному обеспечению, сохраняя высокий уровень безопасности и отказоустойчивости системы.

Сферы применения

Разработанная модель распределённого хранения криптографических ключей на основе шардирования применима в ряде актуальных технологических и пользовательских сценариев. Ниже представлены основные направления использования модели:

- **Web3 и децентрализованные финансы (DeFi).** Модель может быть эффективно применена в инфраструктуре Web3, включая криптокошельки DAO, хранение NFT и обеспечение многофакторного доступа к децентрализованным смарт-контрактам. Поддержка пороговых схем и невозможность единоличного доступа обеспечивают повышенную безопасность.
- **B2B-сегмент и корпоративная безопасность.** В рамках корпоративных систем шардирование ключей позволяет реализовать распределённый контроль доступа к финансовым средствам, API-токенам и внутренним цифровым активам. Это особенно актуально для случаев, когда несколько лиц или отделов должны совместно подтверждать транзакции.
- **Цифровое наследие.** Использование доверенных лиц и сервисов восстановления позволяет организовать надёжную и безопасную передачу доступа к ключам и кошелькам в случае потери доступа владельцем. Такая схема может быть использована при передаче прав наследования или управления цифровыми активами.
- **Интернет вещей (IoT) и edge-устройства.** В условиях ограниченных ресурсов и недоверенных сетей модель позволяет осуществлять локальную аутентификацию и авторизацию устройств через восстановление ключа по шардированным долям, распределённым между участниками IoT-сети.
- **Мобильные криптокошельки.** Применение модели шардирования позволяет обеспечить вос-

Таблица 1.

Сравнения производительности существующих решений с предложенной моделью

Проект	Язык программирования	Время подписи (мс)	Потребление памяти	Безопасность	Сфера применения
TSS-lib (Binance)	Go	50–200	100–300 МБ	Пороговая подпись, стойкость к сбоям	Биржи, криптокошельки
ZenGo X (multi-party-ecdsa)	Rust	100–400	50–200 МБ	Без trusted dealer, криптографическая устойчивость	Умные контракты, MPC-кошельки
MPyC	Python	500–2000	300–600 МБ	Для обучения и прототипов	Исследования, тестирование
Partisia MPC	Rust/Go	200–800	200–500 МБ	Поддержка ZK, DKG, доказуемая стойкость	Web3, корпоративные решения
Схема шардирования эфемерных ключей	Python	600–3 600	110–150 МБ	Шардирование эфемерных ключей, ключи со сроком годности	Web3 / DeFi, мобильные кошельки, B2B-платформы

становление доступа к кошельку даже при потере или повреждении мобильного устройства. Благодаря возможности задействовать доверенные узлы или облачные доли в зашифрованном виде, пользователю не требуется хранить полную резервную копию ключа.

Результаты

В рамках экспериментальной части была проведена имитация потери одной и двух долей. В 100 % случаев система успешно восстанавливала ключ при соблюдении порогового условия ($T = 4$). Наиболее надёжной оказалась комбинация $V1+V2+V3+V6$. Дополнительно протестированы задержки при восстановлении — в среднем 2,3 с на сбор и дешифровку ключа. Объём памяти, используемый на клиенте, не превышал 150 МБ, что допустимо для мобильных устройств. В таблице 2 приведено сравнение с другими MPC-решениями, подтверждающее эффективность предложенной модели.

Результаты эмпирической части показали, что несмотря на увеличение времени выполнения операций в распределённой схеме, рост ресурсоёмкости минимален и оправдан значительным увеличением надёжности хранения.

Таким образом, предложенное решение может быть адаптировано как для персонального использования, так и для бизнес-среды, обеспечивая необходимый баланс между надёжностью, безопасностью и удобством.

Обсуждение

Таким образом, представленная модель и рекомендации обеспечивают надёжную, гибкую и масштабируемую основу для построения безопасных распределённых си-

стем хранения криптографических ключей, применимых как в индивидуальных, так и в институциональных сценариях. Разработка дальнейших инструментов автоматизации разделения, хранения и восстановления долей позволит повысить удобство использования без ущерба для безопасности.

Несмотря на положительные результаты, модель требует наличия хотя бы части доверенных устройств, что может осложнить восстановление в случае их утраты. Для решения этой проблемы предлагается использовать аппаратные модули доверия (TPM, Secure Enclave) и биометрию для верификации восстановления. Также перспективным направлением развития системы является внедрение поддержки постквантовых алгоритмов шардирования и подписи, таких как Kyber и Dilithium. Это повысит устойчивость модели в условиях развития квантовых вычислений.

Заключение

В настоящем исследовании разработаны практические рекомендации по созданию распределённой системы хранения криптографических ключей с применением схемы шардирования и временной привязки ключей. Модель демонстрирует высокий уровень отказоустойчивости, криптографической стойкости и гибкости восстановления. Проведённый сравнительный анализ показал, что предложенное решение по своим характеристикам сопоставимо или превосходит существующие MPC-системы при меньших инфраструктурных затратах. Система может быть адаптирована для применения в Web3, мобильных кошельках, корпоративной безопасности и цифровом наследии. В дальнейшем планируется реализация прототипа на Python с интеграцией в защищённое мобильное приложение и расширением на постквантовые схемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яо А. Протоколы безопасных вычислений // Труды 23-го симпозиума по основам информатики. — IEEE, 1982. — С. 160–164.
2. Гольдрайх О. Основы криптографии. Т. 2: Базовые приложения. — Кембридж: Cambridge University Press, 2004. — 423 с.
3. Binance. tss-lib — Threshold Signature Scheme Library. — URL: <https://github.com/binance-chain/tss-lib> (дата обращения: 16.04.2025).
4. ZenGo X. multi-party-ecdsa — Distributed ECDSA Signing. — URL: <https://github.com/ZenGo-X/multi-party-ecdsa> (дата обращения: 16.04.2025).
5. Schoenmakers B. MPC: Multiparty computation in Python. — URL: <https://github.com/lschoe/mpc> (дата обращения: 16.04.2025).
6. Partisia. Partisia MPC Platform. — URL: <https://partisia.com> (дата обращения: 16.04.2025).
7. Gennaro R., Goldfeder S. Fast Multiparty Threshold ECDSA with Fast Trustless Setup // ACM CCS. — 2018. — С. 1179–1194.
8. Binance. Threshold Signature Performance Benchmark. — URL: <https://blog.binance.com/> (дата обращения: 16.04.2025).
9. Aly A., Blanton M., Mohassel P. Secure Computation Performance Benchmarks. — Cryptology ePrint Archive, Report 2020/1123. — URL: <https://eprint.iacr.org/2020/1123.pdf> (дата обращения: 16.04.2025).
10. Jacobsen M., Damgård I. et al. Partisia Blockchain Whitepaper. — URL: <https://partisiablockchain.com/whitepaper> (дата обращения: 16.04.2025).
11. Salikhov, M.R. Model of a Distributed Storage System for Crypto Wallet Private Keys. *Aut. Control Comp. Sci.* 58, 1289–1296 (2024).

© Салихов Максим Русланович (ic3cr3amsndwtch@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПОИСК СТРУКТУРНОГО ДЕФЕКТА В ДИСКРЕТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ МЕТОДОМ ПРОБНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ¹

SEARCH FOR STRUCTURAL DEFECT IN DISCRETE DYNAMIC SYSTEMS BY THE METHOD OF TRIAL DEVIATIONS OF MODEL PARAMETERS²

S. Shalobanov
S. Shalobanov

Summary. An algorithm for searching for a defect in a discrete dynamic system, with a depth of up to a dynamic block, based on trial deviations of model parameters using integral estimates of signal deviations is considered.

Keywords: trial deviations of model parameters, diagnostic model, integral estimates of signal deviations, integration parameter, diagnostic feature.

Шалобанов Сергей Викторович

д.т.н, профессор, Тихоокеанский государственный
университет, Хабаровск
shalobanov@mail.ru

Шалобанов Сергей Сергеевич

к.т.н, доцент, Тихоокеанский государственный
университет, Хабаровск
shalobanov_ne@mail.ru

Аннотация. Рассматривается алгоритм поиска дефекта в дискретной динамической системе, с глубиной до динамического блока на основе пробных отклонений параметров модели с использованием интегральных оценок отклонений сигналов.

Ключевые слова: пробные отклонения параметров модели, диагностическая модель, интегральные оценки отклонений сигналов, параметр интегрирования, диагностический признак.

Постановка задачи

В качестве объекта диагностирования (ОД) рассматривается дискретный динамический объект, состоящий из отдельных динамических элементов (ДЭ). Под одиночным структурным дефектом будем понимать произвольное изменение передаточной функции одного ДЭ [1, 2].

Примем гипотезу о возможности появления в ОД одиночных структурных дефектов, и синтезируем алгоритм поиска дефектов с использованием интегральных оценок отклонений сигналов номинальной модели от сигналов ОД и сигналов модели при наличии пробных отклонений параметров ДЭ [3, 4].

Алгоритм поиска дефектов

Рассмотрим возможность применения алгоритма диагностирования для линейных дискретных систем с постоянным шагом дискретизации. Алгоритм поиска дефектов основан на определении интегральных оценок отклонений сигналов номинальной дискретной модели

от сигналов ОД. Для получения интегральных оценок отклонений сигналов будем использовать интегральные преобразования временных функций в области вещественных значений параметра интегрирования α , который лежит в пределах $0 \leq \alpha \leq \infty$. Применение интегральных оценок позволяет перейти от обработки временных функций к анализу численных значений функционалов:

$$\begin{cases} \Delta F_i(t) = F_{mi}(t) - F_{oi}(t), \\ \Delta F_i(\alpha) = L\{\Delta F_i(t)\} = \sum_{t=1}^N \Delta F_i(t) \cdot e^{-\alpha \cdot t \cdot T_s}; \quad i = \overline{1, k}, \end{cases} \quad (1)$$

где i — номер контрольной точки; $F_{mi}(t)$ и $F_{oi}(t)$ — сигналы модели и объекта соответственно в i -й контрольной точке; T_k — время контроля объекта диагностирования; k — число контрольных точек; α — параметр интегрирования, N — число дискретных тактов диагностирования для дискретного значения времени $t \in [1, N]$ с дискретным постоянным шагом T_s на интервале наблюдения $[0, T_k]$ (где $T_k = T_s \cdot N$).

В процессе диагностирования вычисляются интегральные оценки отклонений сигналов номинальной

¹ Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-21-20064, <https://rscf.ru/project/24-21-20064/> и Министерства образования и науки Хабаровского края (Соглашение № 126C/2024)

² The research was supported by RSF (project No. 24-21-20064), <https://rscf.ru/project/24-21-20064/> and the Ministry of Education and Science of Khabarovsk Krai (Agreement No. 126C/2024)

дискретной модели от сигналов модели с пробными отклонениями параметров:

$$\begin{cases} \Delta P_{ij}(t) = F_{mi}(t) - P_{ij}(t), \\ \Delta P_{ij}(\alpha) = L\{\Delta P_{ij}(t)\} = \sum_{t=1}^N \Delta P_{ij}(t) \cdot e^{-\alpha \cdot t \cdot Ts}; \\ i = \overline{1, k}, j = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (2)$$

где j — номер одиночного или кратного дефекта, $P_{ij}(t)$ — сигнал модели с пробным отклонением j -го одиночного или кратного дефекта для i -й контрольной точки, n — число всех рассматриваемых одиночных и кратных дефектов.

Выражения (1) и (2) позволяют вычислить элементы векторов ΔF и ΔP , размерность которых определяется количеством контрольных точек.

Диагностический признак наличия дефекта при использовании интегральных оценок сигналов определяется как и для непрерывных динамических систем формулой:

$$J_j = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^k \Delta P_{ij}(\alpha) \cdot \Delta F_i(\alpha) \right]}{\sum_{i=1}^k \Delta P_{ij}^2(\alpha) \cdot \sum_{i=1}^k \Delta F_i^2(\alpha)}, \quad j = \overline{1, n} \quad (3)$$

В процессе диагностирования вычисляются диагностические признаки для каждого блока системы. Минимальное значение диагностического признака указывает на дефектный блок системы. Признак (3) представлен в нормированном виде на шкале от 0 до 1.

Поиск неисправного блока согласно предлагаемому алгоритму сводится к выполнению следующих операций:

1. В качестве дискретной динамической системы рассматривают систему, например, с дискретной интерполяцией нулевого порядка, с шагом дискретизации T_s , состоящую из произвольно соединённых динамических блоков, с количеством рассматриваемых одиночных дефектов блоков m .
2. Предварительно определяют время контроля $T_k \geq T_{\text{пр}}$, где $T_{\text{пр}}$ — время переходного процесса дискретной системы. Время переходного процесса оценивают для номинальных значений параметров динамической системы.
3. Определяют параметр интегрального преобразования сигналов из соотношения $\alpha = \frac{5}{T_k}$.
4. Фиксируют число контрольных точек k .
5. Предварительно определяют элементы векторы $\Delta P_{ij}(\alpha)$ отклонений интегральных оценок сигналов дискретной модели, полученных в резуль-

тате пробных отклонений параметров i -го блока и определённого выше параметра интегрального преобразования α , для чего выполняют пункты 6–9.

6. Подают тестовый сигнал $x(t)$ (единичный ступенчатый, линейно возрастающий, прямоугольный импульсный и т.д.) на вход системы управления с номинальными характеристиками. Принципиальных ограничений на вид входного тестового воздействия предлагаемый способ не предусматривает.
7. Регистрируют реакцию системы $f_{j \text{ ном}}(t)$, $j = 1, 2, \dots, k$ на интервале $t \in [1, N]$ с дискретным шагом T_s секунд на интервале наблюдения $[0, T_k]$ (где $T_k = T_s \cdot N$) в k контрольных точках и определяют дискретные интегральные оценки выходных сигналов

$$F_{j \text{ ном}}(\alpha) = \sum_{t=1}^N f_{j \text{ ном}}(t) \cdot e^{-\alpha \cdot t \cdot Ts}, \quad j = 1, \dots, k$$

системы. Для этого в момент подачи тестового сигнала на вход системы управления с номинальными характеристиками одновременно начинают дискретное интегрирование сигналов системы управления с шагом T_s секунд в каждой из k контрольных точек с дискретными весами $e^{-\alpha t T_s}$, с дискретным шагом T_s секунд, где $\alpha = \frac{5}{T_k}$, для

чего сигналы системы управления подают на первые входы k блоков перемножения, на вторые входы блоков перемножения подают дискретный экспоненциальный сигнал $e^{-\alpha t T_s}$ с шагом T_s секунд, выходные сигналы k блоков перемножения подают на входы k блоков дискретного интегрирования с шагом T_s секунд, дискретное интегрирование завершают в момент времени T_k , полученные в результате дискретного интегрирования оценки выходных сигналов $F_{j \text{ ном}}(\alpha)$, $j = 1, \dots, k$ регистрируют.

8. Определяют интегральные оценки сигналов дискретной модели для каждой из k контрольных точек, полученные в результате пробных отклонений каждого из m одиночных дефектов блоков, для чего поочерёдно для параметра каждого структурного блока дискретной динамической системы вводят пробное отклонение этого параметра дискретной передаточной функции и выполняют пункты 6 и 7 для одного и того же тестового сигнала $x(t)$. Полученные в результате дискретного интегрирования, с шагом T_s секунд, оценки выходных сигналов для каждой из k контрольных точек и каждого из m пробных отклонений

$$P_{ji}(\alpha) = \sum_{t=1}^N P_{ji}(t) \cdot e^{-\alpha \cdot t \cdot Ts}, \quad j = 1, \dots, k; i = 1, \dots, m$$

регистрируют.

9. Определяют отклонения интегральных оценок сигналов дискретной модели, полученные в результате пробных отклонений параметров одного структурного блока

$$\Delta P_{ji}(\alpha) = P_{ji}(\alpha) - F_{j_{\text{ном}}}(\alpha), j = 1, \dots, k; i = 1, \dots, m.$$

10. Замещают систему с номинальными характеристиками контролируемой. На вход системы подаёт аналогичный тестовый сигнал $x(t)$.
11. Определяют интегральные оценки сигналов контролируемой дискретной системы для k контрольных точек

$$F_j(\alpha) = \sum_{t=1}^N f_{j_{\text{ном}}}(t) \cdot e^{-\alpha \cdot t \cdot T_s}, j = 1, \dots, k,$$

осуществляя операции, описанные в пунктах 6 и 7 применительно к контролируемой системе.

12. Определяют отклонения интегральных оценок сигналов контролируемой дискретной системы для k контрольных точек от номинальных значений $\Delta F_j(\alpha) = F_j(\alpha) - F_{j_{\text{ном}}}(\alpha), j = 1, \dots, k$.
13. Вычисляют диагностические признаки наличия неисправного структурного блока по формуле (3).
14. По минимуму значения диагностического признака определяют дефектный блок.

Пример применения метода

Рассмотрим реализацию предлагаемого алгоритма поиска одиночного структурного дефекта для дискретной системы, структурная схема которой представлена на рис.1.

Дискретные передаточные функции блоков:

$$H_1(z) = \frac{k_1(z - Z_1)}{z - Q_1}; H_2(z) = \frac{k_2}{z - Q_2}; H_3(z) = \frac{k_3}{z - Q_3},$$

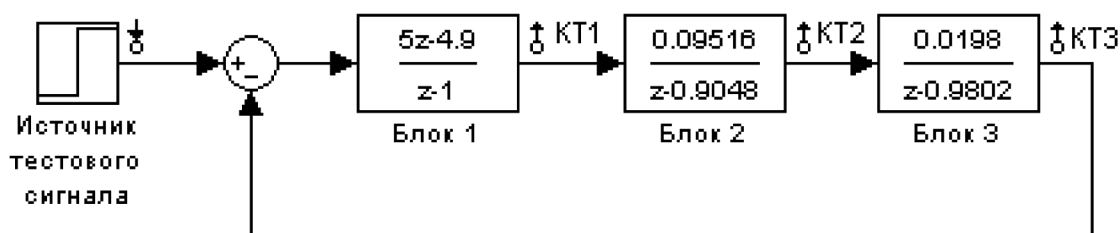


Рис.1. Структурная схема объекта диагностирования

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронин В.В., Шалобанов С.С. Диагностирование непрерывных динамических систем методом пробных отклонений параметров модели // Информатика и системы управления. — 2010. — № 1(23). — С. 121–127.
2. Шалобанов С.С. Улучшение различимости дефектов в непрерывных динамических системах путём многократного интегрирования сигналов // Информатика и системы управления. — 2010. — № 3(25). — С. 88–94.
3. Шалобанов С.С. Способ поиска неисправного блока в дискретной динамической системе. Патент на изобретение №2444774 от 10.03.2012 по заявке №2011101271/08(001575).
4. Воронин В.В., Шалобанов С.С. Способ поиска неисправного блока в дискретной динамической системе. Патент на изобретение №2486569 от 27.06.2013 по заявке №2012120459/08(030847).

ПРИМЕНЕНИЕ ХИРУРГИЧЕСКОГО ШАБЛОНА В ИМПЛАНТОЛОГИИ: ПРЕИМУЩЕСТВА, НЕДОСТАТКИ И КЛИНИЧЕСКИЕ СЛУЧАИ

USE OF SURGICAL TEMPLATE IN IMPLANTOLOGY: ADVANTAGES, DISADVANTAGES AND CLINICAL CASES

S. Alieva

Summary. The study is devoted to assessing the effectiveness of surgical navigation templates in dental implantation on the lower jaw. The paper presents the results of treatment of 20 patients with partial edentia of the lower jaw, who were divided into a control group (n=10) using the traditional method of implantation and a study group (n=10) using navigation templates. In the study group, planning was carried out on the basis of cone beam computed tomography data and digital models in the Implant Studio program, followed by the production of individual navigation templates using 3D printing. The results of the study demonstrated a statistically significant reduction in the time of surgical intervention by 26.00 minutes ($p<0.0001$) and an earlier start of prosthetics by 1.0 month ($p=0.0489$) in the study group compared to the control group. A clinical case of successful use of a navigation template in a 42-year-old patient in conditions of close location of the roots of adjacent teeth is described, where the use of this technology ensured accurate positioning of implants and the possibility of immediate loading. The obtained results indicate the advantages of navigation templates, which are especially significant in complex clinical situations requiring high accuracy of implantation.

Keywords: dental implantology, surgical navigation template, CAD/CAM technologies, 3D printing, minimally invasive implantation, accuracy of implant positioning, esthetic zone, digital planning.

Алиева Севиндж Паша кызы

Ассистент, ФБГОУ ВО Первый Санкт-Петербургский
государственный медицинский
университет им. И.П. Павлова
alievasp22@gmail.com

Аннотация. Исследование посвящено оценке эффективности применения хирургических навигационных шаблонов при дентальной имплантации на нижней челюсти. В работе представлены результаты лечения 20 пациентов с частичной адентией нижней челюсти, которые были разделены на контрольную группу (n=10) с применением традиционного метода имплантации и исследуемую группу (n=10) с использованием навигационных шаблонов. В исследуемой группе планирование осуществлялось на основе данных конусно-лучевой компьютерной томографии и цифровых моделей в программе Implant Studio с последующим изготовлением индивидуальных навигационных шаблонов методом 3D-печати. Результаты исследования продемонстрировали статистически значимое сокращение времени хирургического вмешательства на 26,00 минут ($p<0,0001$) и более раннее начало протезирования на 1,0 месяц ($p=0,0489$) в исследуемой группе по сравнению с контрольной. Описан клинический случай успешного применения навигационного шаблона у пациента 42 лет в условиях близкого расположения корней соседних зубов, где использование данной технологии обеспечило точное позиционирование имплантатов и возможность немедленной нагрузки. Полученные результаты свидетельствуют о преимуществах навигационных шаблонов, которые особенно значимы в сложных клинических ситуациях, требующих высокой точности имплантации.

Ключевые слова: дентальная имплантология, хирургический навигационный шаблон, CAD/CAM технологии, 3D-печать, малоинвазивная имплантация, точность позиционирования имплантатов, эстетическая зона, цифровое планирование.

В современной дентальной имплантологии ключевое значение имеет точность позиционирования имплантатов, напрямую влияющая на долгосрочный успех лечения [1]. Неправильная установка может привести к серьезным осложнениям, включая некорректный наклон имплантата и нарушение биологической ширины. Хирургические шаблоны стали важным компонентом цифрового протокола имплантации, обеспечивая точный перенос виртуального плана в клинические условия [2,3].

Исследования показывают, что применение шаблонов существенно повышает точность позиционирования, уменьшая отклонение до 0,1–0,8 мм по позиции

и 1–3° по углу наклона [1]. Однако научная литература содержит недостаточно данных о клиническом применении различных типов шаблонов, особенно разборных конструкций [4]. В данной статье анализируются преимущества и ограничения хирургических шаблонов в имплантологии с демонстрацией клинических случаев, подтверждающих эффективность технологии.

Дентальная имплантология предлагает различные подходы к изготовлению хирургических шаблонов, среди которых CAD/CAM технологии занимают лидирующее положение благодаря высокой точности компьютерного моделирования с учетом индивидуальных анатомических особенностей пациента [5].

3D-печать стала наиболее распространенным методом производства шаблонов, обеспечивая оптимальный баланс точности, скорости и стоимости. Исследования Koch и соавт. демонстрируют, что даже относительно доступные 3D-принтеры (\$3,500) способны создавать шаблоны с точностью, сравнимой с профессиональными установками стоимостью \$70,000–\$85,000. Процесс включает сбор диагностических данных, виртуальное планирование в специализированных программах, экспорт дизайна в STL-формате и непосредственно печать с последующей постобработкой [6].

Программные решения, такие как Simplant, NobelGuide и X-Guide, позволяют спланировать оптимальное положение имплантатов и сформировать цифровую модель шаблона с необходимыми параметрами. Традиционное лабораторное изготовление шаблонов на гипсовых моделях постепенно уступает место цифровым методам из-за меньшей точности и более длительного процесса производства [7,8].

По способу фиксации шаблоны классифицируются на зубоопорные, слизистоопорные, костноопорные и комбинированные, каждый из которых имеет свои показания к применению и особенности использования в клинической практике [9].

Точность изготовления шаблона напрямую влияет на успешность имплантации. Исследования демонстрируют, что современные методы 3D-печати обеспечивают точность на уровне микрометров, что позволяет минимизировать отклонения между запланированным и фактическим положением имплантатов. Например, разрешение современных SLA принтеров достигает 25 мкм, а диаметр лазерного пятна составляет около 140 мкм, что обеспечивает высокую детализацию шаблона [6].

Исследования показывают, что хирургические шаблоны значительно повышают точность позиционирования имплантатов. Метаанализ 2018 года, охвативший 362 публикации (из которых 6 соответствовали критериям включения), выявил существенные преимущества компьютерных хирургических шаблонов по сравнению с традиционной техникой «свободной руки». Хотя уровень выживаемости имплантатов не показал статистически значимой разницы между методами (OR = 1,71, 95 % CI 0,65–4,51), технология шаблонов продемонстрировала значительное улучшение в угловом отклонении (средняя разница -5,45 градуса, 95 % CI от -0,66 до -4,24 градуса) и апикальном смещении (средняя разница -0,83 мм, 95 % CI от -1,12 до -0,54) [10]. Это подтверждает, что основное преимущество шаблонов — повышение точности позиционирования, особенно важное в сложных клинических случаях.

Однако следует отметить, что показатели выживаемости не всегда отражают полную клиническую картину.

Несмотря на то, что в современной стоматологической литературе часто указываются высокие показатели успеха дентальных имплантатов (от 95 % до 98 %), данные клинической практики демонстрируют более комплексную картину. Применение новейших методов диагностики, в частности конусно-лучевой компьютерной томографии (КЛКТ), позволяет выявить значительное количество осложнений, связанных с неоптимальным позиционированием имплантатов, которые могут

Масштабное исследование, проведенное в крупных диагностических центрах Бухареста (Румыния), выявило неожиданно высокий процент осложнений, связанных с позиционированием имплантатов. При анализе 2323 КЛКТ-снимков обнаружено, что 6,89 % случаев (160 пациентов) имели различные осложнения, возникшие вследствие нарушения хирургического протокола имплантации. Наиболее распространенными осложнениями являлись: проникновение имплантата в верхнечелюстную пазуху (21 случай), перфорация дна носовой полости (19 случаев), повреждение нижнего альвеолярного нерва (9 случаев) и перфорация язычной кортикальной пластинки нижней челюсти (13 случаев). Особую тревогу вызывают 15 зафиксированных случаев повреждения соседних зубов [11].

Эти данные вступают в противоречие с оптимистичными сообщениями о минимальных рисках дентальной имплантации, которые встречаются в рекламных и некоторых научных публикациях. Исследования, проведенные Ribas и соавт. (2020), подтверждают наличие проблемы, указывая на распространенность ошибок позиционирования имплантатов и их связь с анатомическими вариациями и особенностями строения челюстно-лицевой области [12].

Одной из основных причин подобных осложнений является отсутствие предварительного планирования с использованием современных технологий визуализации. Gaeta-Araujo и соавт. (2020) в своем ретроспективном анализе КЛКТ-снимков продемонстрировали, что значительное количество перфораций анатомических структур и неадекватных расстояний между имплантатами/зубами можно было избежать при надлежащем предоперационном планировании [13].

Шаблонная имплантология представляет собой эффективный метод минимизации подобных рисков. Тем не менее, Chackartchi и соавт. (2022) отмечают, что даже при использовании хирургических шаблонов возможны ошибки, которые могут привести к неправильному позиционированию имплантатов. Авторы подчеркивают, что точность направленной имплантации зависит от множества факторов: качества КЛКТ-снимков, программного обеспечения для планирования, точности 3D-печати шаблона, опыта хирурга и протокола фиксации шаблона [14].

Несмотря на эти потенциальные ограничения, хирургические навигационные шаблоны представляют собой революционный инструмент, позволяющий существенно оптимизировать хирургический этап лечения. Среди многочисленных преимуществ данной технологии особенно выделяются два ключевых аспекта: значительное сокращение времени оперативного вмешательства и возможность проведения малоинвазивных процедур. Применение навигационных шаблонов позволяет уменьшить продолжительность операции почти в три раза по сравнению с традиционными методиками, что не только снижает нагрузку на хирурга, но и существенно повышает комфорт пациента во время процедуры. Одновременно с этим, технология обеспечивает возможность проведения имплантации без отслаивания слизисто-надкостничного лоскута, что минимизирует травматизацию тканей, сокращает период реабилитации и способствует сохранению архитектоники мягких тканей.

Работа В.Г. Логунковой и соавт. (2024), представленная на конференции Digital Diagnostics, документально подтвердила сокращение операционного времени в группе пациентов, которым проводили имплантацию с применением разборных навигационных шаблонов. Временные показатели в основной группе оказались существенно лучше по сравнению с контрольной группой, где использовалась традиционная техника с простыми шаблонами [15].

Эти данные согласуются с результатами исследования Block и соавт. (2017), которые установили, что применение динамических навигационных систем сокращает время хирургического вмешательства в среднем на 50 % по сравнению с традиционными техниками имплантации. Интересно отметить, что согласно представленным данным, время операции при использовании навигационного шаблона составляет в среднем 16,1 минуты, тогда как при традиционном методе этот показатель достигает 46,3 минуты. Экономия операционного времени особенно значима в случаях полного протезирования, требующих установки множественных имплантатов [16].

Для иллюстрации практического применения описанных преимуществ навигационной имплантологии рассмотрим клинический случай, демонстрирующий эффективность данной технологии в особенно требовательной клинической ситуации — при имплантации в эстетически значимой зоне, где точность позиционирования и сохранение архитектоники мягких тканей играют критическую роль в достижении оптимального результата лечения.

Исследование включало 20 пациентов (средний возраст $42,7 \pm 8,3$ года), разделенных на две равные группы: контрольную (традиционный метод имплантации) и ис-

следуемую (с применением навигационных шаблонов). Критерии включения: частичная адентия нижней челюсти, отсутствие абсолютных противопоказаний, завершение роста костей лицевого скелета.

Предоперационное обследование включало клинический осмотр, КЛКТ и снятие оттисков (цифровых в исследуемой группе, традиционных — в контрольной). В исследуемой группе планирование проводилось в программе Implant Studio путем совмещения КЛКТ и цифровых моделей, что позволяло позиционировать имплантаты с учетом будущей ортопедической конструкции.

Хирургические шаблоны для исследуемой группы изготавливались методом стереолитографической 3D-печати из биосовместимой смолы. Оперативные вмешательства в обеих группах выполнялись одним хирургом с использованием имплантатов Straumann и Nobel Biocare.

В представленном клиническом случае пациенту 42 лет с частичной адентией нижней челюсти (отсутствие зубов 3.5, 3.6) была выполнена дентальная имплантация с использованием навигационного шаблона. Особенности клинической ситуации являлись близкое расположение корней соседних зубов и необходимость обеспечения оптимального торка имплантатов для возможности немедленной нагрузки. Была проведена КЛКТ на аппарате Galileos Comfort Plus (Sirona) с размером вокселя 0,15 мм. Получение цифровой модели осуществлялось с помощью интраорального сканера Trios 3 (3Shape). Виртуальное планирование проводилось в программе Implant Studio (3Shape) с определением оптимальной позиции имплантатов с учетом планируемой ортопедической конструкции и анатомических ограничений. Хирургический шаблон был изготовлен методом 3D-печати с опорой на зубы и слизистую оболочку альвеолярного отростка. Операция включала формирование слизисто-надкостничного лоскута, препарирование ложа имплантатов с использованием навигационного шаблона и установку двух имплантатов Straumann BLT (диаметром 4,1 мм и длиной 10 мм).

Клинический случай: Пациентка: женщина, 1977 г.р., обратилась с жалобами на отсутствие 41, 31 зубов и подвижность 43, 42, 33, 32 зубов.

Диагностика: По данным КТ выявлена вторичная частичная адентия в области 41, 31 зубов и пародонтит 43, 42, 32, 33 зубов. Толщина альвеолярного отростка в области 31, 41 зубов составила 5 мм, в области 42, 43, 33, 32 зубов — 7–8 мм. Высота альвеолярного отростка во всех областях — 15 мм. Плотность костной ткани — 850 HU.

Планирование: На основании данных КТ с использованием программы Медиалайз было спланировано

удаление 43, 42, 32, 33 зубов, расщепление альвеолярного гребня и установка двух имплантатов в позиции 43 и 33 с применением хирургического шаблона. При планировании особое внимание уделялось достижению оптимального торка имплантатов для возможности немедленной нагрузки, учитывая близкое расположение соседних зубов и анатомические особенности фронтального отдела нижней челюсти.

Хирургический этап: Операция выполнена с откидыванием лоскута и использованием хирургического шаблона. Была проведена установка имплантатов в запланированных позициях после расщепления альвеолярного гребня. Продолжительность операции составила всего 32 минуты, что на 26 минут меньше среднего времени аналогичных вмешательств без использования шаблона (по данным исследуемой группы). Осложнений во время хирургического вмешательства не отмечалось.

Послеоперационный период: Операционное поле было ушито, швы сняты через 10 дней. Период реабилитации протекал комфортно, без выраженного болевого синдрома. Сразу после снятия швов была изготовлена и установлена временная ортопедическая конструкция, что позволило начать протезирование на 1 месяц раньше по сравнению со стандартным протоколом.

Результат: Постоянное протезирование проведено через 4 месяца. Точность установки имплантатов полностью соответствовала предоперационному виртуальному планированию, что обеспечило оптимальное положение ортопедической конструкции с правильным распределением жевательной нагрузки. Благодаря правильному торку имплантатов удалось достичь стабильной немедленной нагрузки, несмотря на ограниченное пространство между корнями соседних зубов.

Обсуждение

Применение хирургических навигационных шаблонов в дентальной имплантологии представляет собой инновационный подход, позволяющий значительно повысить точность и эффективность хирургического этапа лечения. Представленный клинический случай наглядно демонстрирует основные преимущества данной технологии, которые согласуются с результатами проведенного исследования.

Одним из ключевых преимуществ применения навигационных шаблонов является существенное сокращение времени хирургического вмешательства. В нашем исследовании было выявлено статистически достоверное ($p < 0,0001$) уменьшение продолжительности операции на 26 минут при использовании шаблонов. В представленном клиническом случае операция длилась всего 32 минуты, что соответствует общей тенденции, наблюдае-

мой в исследуемой группе, где медиана времени хирургического вмешательства составила 70,00 минут [60,00; 79,69]. Это согласуется с данными других исследований, например, работой Логунковой и соавт. (2024), где было показано, что время операции при использовании навигационного шаблона составляет в среднем 16,1 минуты против 46,3 минуты при традиционном методе. Экономия операционного времени имеет множество преимуществ: снижение хирургического стресса для пациента, уменьшение физической нагрузки на врача, экономия ресурсов клиники.

Другим значимым преимуществом является повышенная точность позиционирования имплантатов. В нашем клиническом случае точное расположение имплантатов было критически важным фактором из-за близкого расположения соседних зубов и необходимости обеспечения оптимального торка для возможности немедленной нагрузки. Использование навигационного шаблона позволило установить имплантаты именно в запланированные позиции с минимальными отклонениями, что подтверждается послеоперационным контролем. Это соответствует данным метаанализа, упомянутого в контексте, где было показано значительное снижение углового отклонения ($-5,45^\circ$) и апикального смещения ($-0,83$ мм) при использовании шаблонов.

Особенно ценным результатом применения навигационных шаблонов оказалось более раннее начало протезирования. В нашем исследовании было установлено, что в группе с применением шаблонов протезирование начиналось в среднем на 1,0 месяц раньше, чем в контрольной группе ($p = 0,0489$). В представленном клиническом случае сразу после снятия швов (через 10 дней после операции) была изготовлена и установлена временная ортопедическая конструкция, что соответствует выявленной тенденции. Это преимущество имеет не только клиническое значение, но и существенно повышает удовлетворенность пациентов результатами лечения, поскольку сокращает общую продолжительность реабилитации.

Малоинвазивный характер вмешательства, возможный при использовании навигационных шаблонов, также является значимым преимуществом технологии. Хотя в данном клиническом случае была применена техника с откидыванием лоскута, что объясняется необходимостью проведения расщепления альвеолярного гребня, в большинстве случаев применение шаблонов позволяет реализовать flapless-протокол, минимизирующий травматизацию тканей и способствующий сохранению архитектоники мягких тканей.

Важно отметить, что использование навигационных шаблонов позволило обеспечить оптимальный торк имплантатов для возможности немедленной нагрузки, не-

смотря на ограниченное пространство между корнями соседних зубов. Это имеет особое значение в контексте минимизации рисков осложнений, связанных с неправильным позиционированием имплантатов, таких как повреждение соседних анатомических структур или некорректная биомеханика будущей ортопедической конструкции.

Проведенное исследование показывает существенные преимущества применения хирургических навигационных шаблонов в дентальной имплантологии. Представленный клинический случай наглядно демонстрирует высокую точность позиционирования имплантата с минимальными отклонениями от запланированного положения, что имеет решающее значение в эстетически значимой зоне. Использование шаблона позволило провести малоинвазивное вмешательство без отслаивания слизисто-надкостничного лоскута, со-

хранив архитектуру мягких тканей и обеспечив оптимальный эстетический результат.

Существенное сокращение операционного времени подтверждает экономическую и клиническую эффективность технологии.

Точность направленной имплантации обусловлена качественной предоперационной диагностикой, использованием современного программного обеспечения и высокоточным изготовлением шаблона методом стереолитографии. Клинические результаты свидетельствуют о том, что хирургические навигационные шаблоны являются надежным инструментом повышения безопасности, предсказуемости и эффективности дентальной имплантации, особенно в сложных клинических случаях, требующих прецизионной точности позиционирования имплантатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мамедов С.К., Лежава Н., Таранова Н.Ю., Кобец К.К., Белов Е.А., Триандафилов С.А., Семенова Ю.А., Бороздкин Л.Л. Применение разборных хирургических шаблонов при дентальной имплантации // МНИЖ. 2024. №7 (145).
2. Ажибеков А.С., Менчишева Ю.А. Виды осложнений при дентальной имплантации (обзор литературы) // Вестник КазНМУ. 2022. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vidy-oslozhneniy-pri-dentalnoy-implantatsii-obzor-literatury> (дата обращения: 16.04.2025).
3. Han L., Zhang X., Guo Z., Long J. Application of optimized digital surgical guides in mandibular resection and reconstruction with vascularized fibula flaps: Two case reports // Medicine. 2020. Vol. 99. P. e21942. DOI: 10.1097/MD.00000000000021942.
4. Youssef M., Tatakis D., Demko C., Schincaglia G.P. Knowledge and use of digital technologies in periodontal practices in the United States: A survey study // Journal of periodontology. 2025. DOI: 10.1002/JPER.24-0306.
5. Barone S., Casinelli M., Frascaria M., Paoli A., Rationale A. Interactive design of dental implant placements through CAD-CAM technologies: from 3D imaging to additive manufacturing // International Journal for Interactive Design and Manufacturing (IJDeM). 2014. Vol. 10. DOI: 10.1007/s12008-014-0229-0.
6. Koch G., James B., Gallucci G., Hamilton A. Surgical Template Fabrication Using Cost-Effective 3D Printers // The International Journal of Prosthodontics. 2018. Vol. 32. P. 97–100. DOI: 10.11607/ijp.5975.
7. Di Brigida L., Cortese A., Cataldo E., Naddeo A. A New Method to Design and Manufacture a Low-Cost Custom-Made Template for Mandible Cut and Repositioning Using Standard Plates in BSSO Surgery // Bioengineering. 2024. Vol. 11. P. 668. DOI: 10.3390/bioengineering11070668.
8. Salem D., Reher P., Evans J.L., Mansour M.H. Exploring digital technologies used in the design and manufacture of craniofacial implant surgical guides: A scoping review // The Journal of Prosthetic Dentistry. 2024. Vol. 131. №6. P. 1264–1270. DOI: 10.1016/j.prosdent.2023.01.003.
9. Седов Ю.Г., Аванесов А.М., Салеев Р.А., Салеева Г.Т., Ярулина З.И. Классификация вариантов применения хирургических направляющих шаблонов для дентальной имплантации // Стоматология. 2021. Т. 100. №1. С. 84–88.
10. Chen S., Ou Q., Lin X., Wang Y. Comparison Between a Computer-Aided Surgical Template and the Free-Hand Method: A Systematic Review and Meta-Analysis // Implant Dentistry. 2019. Vol. 28. №6. P. 578–589. DOI: 10.1097/ID.0000000000000915.
11. Clark-Perry D., Barbu H., Lorean A., Mijiritsky E., Levin L. Incidental findings of implant complications on postimplantation CBCTs: A cross-sectional study // Clinical implant dentistry and related research. 2017. Vol. 19. DOI: 10.1111/cid.12511.
12. Ribas B.R., Nascimento E.H.L., Freitas D.Q., Pontual A.D.A., Pontual M., Perez D.E.C., Ramos-Perez F.M.M. Positioning errors of dental implants and their associations with adjacent structures and anatomical variations: A CBCT-based study // Imaging Science in Dentistry. 2020. Vol. 50. P. 281–290.
13. Gaeta-Araujo H., Oliveira-Santos N., Mancini A.X.M., Oliveira M.L., Oliveira-Santos C. Retrospective assessment of dental implant-related perforations of relevant anatomical structures and inadequate spacing between implants/teeth using cone-beam computed tomography // Clinical Oral Investigations. 2020. Vol. 24. P. 3281–3288.
14. Chackartchi T., Romanos G.E., Parkanyi L., Schwarz F., Sculean A. Reducing errors in guided implant surgery to optimize treatment outcomes // Periodontology 2000. 2022. Vol. 88. P. 64–72.
15. Логункова В.Г., Мазлум М.М., Кузнецов А.В. Применение разборных хирургических шаблонов при полном протезировании с немедленной нагрузкой // Digital Diagnostics. Т. 5. № S1. С. 53–55. DOI: 10.17816/DD626183.
16. Block M.S., Emery R.W., Cullum D.R. Implant placement is more accurate using dynamic navigation // Journal of Oral and Maxillofacial Surgery. 2017. Vol. 75. №7. P. 1377–1386.

© Алиева Севиндж Паша кызы (alievasp22@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РЕЦИДИВ HER2-ПОЗИТИВНОГО РАКА МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ У ПРЕМЕНОПАУЗАЛЬНЫХ И ПОСТМЕНОПАУЗАЛЬНЫХ ПАЦИЕНТОВ, ДОСТИГШИХ ПАТОМОРФОЛОГИЧЕСКИЙ ПОЛНЫЙ ОТВЕТ НА НЕОАДЬЮВАНТНУЮ СИСТЕМНУЮ ТЕРАПИЮ

RECURRENCE OF HER2-POSITIVE BREAST CANCER IN PREMENOPAUSAL AND POSTMENOPAUSAL PATIENTS WHO HAVE ACHIEVED A PATHOLOGICALLY COMPLETE RESPONSE TO NEOADJUVANT SYSTEMIC THERAPY

**N. Bekkeldieva
V. Semiglazov
P. Krivorotko
K. Zernov**

Summary. *Introduction* The current standard of treatment for patients with HER2-positive breast cancer who experience a pathomorphological complete response (pCR) after neoadjuvant therapy is to continue targeted adjuvant therapy with any degree of pathomorphological regression of the tumor. However, there is an ongoing debate about how different long-term outcomes are depending on RCB, i.e. the degree of pathomorphological response of the tumor.

The aim of the study was to evaluate the effectiveness of dual targeted therapy in achieving a complete pathomorphological response in premenopausal and postmenopausal patients.

Materials and methods. The study included 124 patients with breast cancer (with clinical stage II) who received treatment at the Department of breast Tumors of the Federal State Budgetary Institution «National Medical Research Center of Oncology named after N. N. Petrov» of the Ministry of Health of the Russian Federation from 2020 to 2022, who were divided into 2 groups depending on the age category. The first group included premenopausal patients, and the second group included postmenopausal patients. All patients received neoadjuvant systemic therapy with dual targeted therapy. After completion of neoadjuvant systemic therapy, surgical intervention of various volumes was performed, followed by a histological examination to assess the degree of pathomorphological regression of the tumor.

Results: A complete pathomorphological tumor response (csc) was achieved in 58 (75.3 %) premenopausal patients, and in 36 (76.6 %) postmenopausal patients. Partial pathomorphological regression was achieved in 19 (24.7 %) premenopausal and 11 (23.4 %) postmenopausal patients with 3-year disease-free survival of 86.8 % (95 % CI 74.1–93.5) in premenopausal patients versus 90.5 % (95% CI 73.2–96.9) in the postmenopausal group ($p = 0.476$).

Conclusions. The use of neoadjuvant chemotherapy and anti-HER2 double targeted blockade in patients with HER2-positive breast cancer

Беккелдиева Нестан Беккелдиевна

аспирант, ФГБУ «Национальный медицинский
исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Петрова»
bekkeldiyeva.n@bk.ru

Семиглазов Владимир Федорович

доктор медицинских наук, член-корреспондент
РАН, профессор, ФГБУ «Национальный медицинский
исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Петрова»
vsemiglazov@mail.ru

Криворотко Петр Владимирович

доктор медицинских наук, профессор,
ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский
центр онкологии им. Н.Н. Петрова»
dr.krivorotko@mail.ru

Зернов Константин Юрьевич

кандидат медицинских наук,
ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский
центр онкологии им. Н.Н. Петрова»
konstantin_zernov@hotmail.com

Аннотация. Введение. Современный стандарт лечения пациентов с HER2-позитивным раком молочной железы, у которых наблюдается патоморфологический полный ответ (pCR) после неoadъювантной терапии, заключается в продолжении таргетной терапии в адъювантном режиме при любой степени патоморфологического регресса опухоли. Однако продолжается дискуссия, насколько различаются долгосрочные результаты в зависимости от RCB, т.е. степени патоморфологического ответа опухоли.

Цель исследования: оценить эффективность двойной таргетной терапии при достижении полного патоморфологического ответа у пременопаузальных и постменопаузальных пациентов.

Материалы и методы. В исследование включены 124 пациента с РМЖ (со II клинической стадией), получавших лечение на базе отделения опухолей молочной железы ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Петрова» Минздрава России, в период с 2020 по 2022 г., которые были распределены на 2 группы в зависимости от возрастной категории. В первую группу вошли пременопаузальные пациенты, во вторую группу — постменопаузальные. Все пациенты получали неoadъювантную системную терапию с двойной таргетной терапией. После завершения неoadъювантной системной терапии, выполнялось хирургическое вмешательство различного объема, с последующим гистологическим исследованием, с оценкой степени достижения патоморфологического регресса опухоли.

Результаты. Полный патоморфологический ответ опухоли (pCR) достигнут у 58 (75,3 %) пременопаузальных пациентов, у 36 (76,6 %) — постменопаузальных.

allowed achieving a complete pathomorphological response in the majority of premenopausal and postmenopausal patients, 75.3 % and 76.6 %, respectively ($p > 0.005$). The achievement of a complete pathomorphological tumor response (pCR) to HCT in both premenopausal and postmenopausal patients was «translated» into high rates of 3-year disease-free survival.

Keywords: HER2-positive breast cancer, achievement of pCR; systemic targeted therapy, premenopausal and postmenopausal patients, disease-free survival.

узных. Частичный патоморфологический регресс достигнут у 19 (24,7 %) пременопаузальных, у 11 (23,4 %) постменопаузальных пациентов 3-летней безрецидивная выживаемость составила 86,8 % (95 % ДИ 74,1–93,5) у пременопаузальных пациентов vs 90,5 % (95 % ДИ 73,2–96,9) в группе постменопаузальных ($p = 0,476$).

Выводы. Применение неоадъювантной химиотерапии и анти-HER2 двойной таргетной блокады, у пациентов с HER2-позитивным РМЖ, позволило достичь полный патоморфологический ответ у большинства пременопаузальных и постменопаузальных пациентов, 75,3 % и 76,6 %, соответственно ($p > 0,005$). Достижение полного патоморфологического ответа опухоли (pCR) на HCT как у пременопаузальных, так и постменопаузальных пациентов, «транслировалось» в высокие показатели 3-летней безрецидивной выживаемости.

Ключевые слова: HER2-позитивный рак молочной железы, достижение pCR; системная таргетная терапия, пременопаузальные и постменопаузальные пациенты, безрецидивная выживаемость.

Введение

HER2 — позитивный рак молочной железы (РМЖ) составляет около 20 % от всех случаев РМЖ и придает этому биологическому подтипу более агрессивное клиническое течение и худший прогноз при отсутствии лечения [1,2,3]. Однако разработка и внедрение в практику различных лекарственных агентов, воздействующих на HER2, обеспечила значительные клинические преимущества на ранних и поздних стадиях заболевания, изменив траекторию его естественного течения [4,5,6,7,8,9,10].

Этот биологический подтип опухоли, чаще выявляется у молодых пациентов [11]. Предыдущие исследования показали, что молодой возраст является независимым фактором риска рецидива заболевания и смерти [12,13]. Однако ни в одном из предыдущих исследований, оценивающих прогностическое влияние возраста, не проводился адекватный контроль молекулярного подтипа опухоли (т.е. трижды негативный РМЖ, HER2 — позитивный), который оказывает явное влияние на исходы у пациентов [14]. Остается неясным, влияет ли возраст независимым фактором прогноза с учетом современных схем лечения при HER2-позитивном РМЖ.

Вместе с тем уже доказано, что после неоадъювантного лечения, включающего таргетную анти-HER2 терапию около 50–65 % пациентов с HER2-позитивным РМЖ достигают полного патоморфологического ответа (pCR), определяемого как отсутствие инвазивного рака в ткани молочной железы и лимфатических узлах в операционном материале. Патоморфологически полный ответ (pCR) продемонстрировал прогностическую ценность на уровне пациента, поскольку имеет положительную связь с безрецидивной выживаемостью (DFS) и общей выживаемостью (OS). В результате он стал использо-

ваться для определения тактики постнеоадъювантного лечения с учетом величины риска [15]. Пациентов с резидуальным заболеванием после HAXT обычно рассматривают для перехода на лечение без перекрестной резистентности, тогда как в случае полного патоморфологического регресса обычно не рекомендуется интенсификация лечения [16]. Однако у части пациентов с pCR в конечном итоге может произойти рецидив заболевания: согласно большому объединенному анализу на уровне пациентов, трехлетняя бессобытийная выживаемость (EFS) достигает 95 % [17].

Патоморфологический полный ответ (pCR) связан с бессобытийной выживаемостью (EFS) и общей выживаемостью (OS) только на уровне пациента, независимо от того, каким образом он был достигнут. Однако связь на уровне клинических испытаний слабее, поскольку pCR включает в себя и другие прогностические факторы (например, исходную стадию), но не постнеоадъювантное лечение (которое оказывает влияние на показатели выживаемости) и не полностью отображает способность последующего лечения модифицировать клиническое течение заболевания [18].

Материалы и методы

Ретроспективный дизайн исследования был использован для сбора данных пациентов, закончивших лечение на базе отделения опухолей молочной железы ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Петрова» Минздрава России. В исследование включены 124 пациента с РМЖ (со II клинической стадией), получавших лечение в период с 2020 по 2022 г., которые были распределены на 2 группы в зависимости от возрастной категории. В первую группу вошли пременопаузальные пациенты, во вторую группу — постменопаузальные. Все пациенты получали неоадъювантную системную терапию по схемам:

Таблица 1.

Общая клинико-морфологическая характеристика пациентов

Характеристика		Менопаузальный статус	
		Женщины в пременопаузе	Женщины в постменопаузе
Средний возраст		40 лет	55 лет
(с)Т	1	6 (7,8 %)	3 (6,4 %)
	2	71 (92,2 %)	44 (93,6 %)
(с)N	0	34 (44,2 %)	24 (51,1 %)
	1	43 (55,8 %)	23 (48,9 %)
G	2	51 (66,2 %)	17 (36,2 %)
	3	26 (33,8 %)	30 (63,8 %)
Биологический подтип	HR-/HER2+	34 (44,2 %)	28 (59,6 %)
	HR+/HER2+	43 (55,8 %)	19 (40,4 %)
Схема неоадъювантной химиотерапии	ТСНР	47 (61,0 %)	28 (59,6 %)
	АС–НР	27 (35,1 %)	14 (29,8 %)
	ТНР	3 (3,9 %)	5 (10,6 %)
Объем операции	ОСО	27 (35,1 %)	26 (55,3 %)
	МЭ	47 (61,1 %)	15 (31,9 %)
	ВАО	3 (3,8 %)	6 (12,8 %)
(p)Т	0	47 (61,0 %)	36 (76,6 %)
	1	19 (24,7 %)	10 (21,3 %)
	is	11 (14,3 %)	1 (2,1 %)
(p)N	0	71 (92,2 %)	44 (93,6 %)
	1	5 (6,5 %)	2 (4,3 %)
	2	1 (1,3 %)	1 (2,1 %)
RCB	pCR	58 (75,3 %)	36 (76,6 %)
	RCB1	10 (13,0 %)	7 (14,9 %)
	RCB2	5 (6,5 %)	4 (8,5 %)
	RCB3	4 (5,2 %)	0 (0,0 %)
Адъювантная таргетная терапия	Кадсила	12 (15,6 %)	8 (17,0 %)
	Трастузумаб	59 (76,6 %)	36 (76,6 %)
	Трастузумаб + Пертузумаб	6 (7,8 %)	3 (6,4 %)

1. АС-Т-НР [доксорубин 60 мг/м² + циклофосфамид 600 мг/м² 1 раз в 21 день, 4 цикла → доцетаксел 75 мг/м² + трастузумаб 6 мг/кг (нагрузочная доза 8 мг/кг) + пертузумаб 420 мг (нагрузочная доза 840 мг) 1 раз в 21, 4 цикла]
2. ТСНР [доцетаксел 75 мг/м² + карбоплатин АУС6 + трастузумаб 6 мг/кг (нагрузочная доза 8 мг/кг) + пертузумаб 420 мг (нагрузочная доза 840 мг) 1 раз в 21 день, 6 циклов].
3. ТНР [доцетаксел 75 мг/м² + трастузумаб 6 мг/кг (нагрузочная доза 8 мг/кг) + пертузумаб 420 мг (нагрузочная доза 840 мг) 1 раз в 21 день, 6 циклов].

После завершения неоадъювантной системной терапии, выполнялось хирургическое вмешательство различного объема с последующим патоморфологическим исследованием, с оценкой степени достижения патоморфологического регресса (по системе RCB).

В качестве первичной конечной точки была оценка полного патоморфологического ответа опухоли (pCR). Вторичная конечная точка включала 3-летнюю безрецидивную выживаемость у пациентов с полным патоморфологическим регрессом, в зависимости от менопаузального статуса.

Статистический анализ проводился с использованием программы StatTech v. 4.2.6 (разработчик — ООО «Статтех», Россия). Показатели и кривые безрецидивной (DFS) выживаемости оценивали по методу Каплана-Мейера. Анализ выживаемости проводился также по методу регрессии Кокса, подразумевающему прогнозирование риска наступления события для рассматриваемого объекта и оценку влияния заранее определенных независимых переменных (предикторов) на этот риск. Сравнение процентных долей при анализе «четырёхпольных таблиц сопряженности» выполнялось с помощью критерия хи-квадрат Пирсона. В качестве количественной меры эффекта при сравнении относительных показателей использовался показатель отношения шансов с 95 % доверительным интервалом (OR; 95 % CI).

Результаты

Из ранее проанализированных пациентов в окончательный анализ включены 124 женщины. Клинико-морфологические характеристики пациентов приведены в табл.1. В исследуемых группах распределение было следующим. Из них 77 (62,1 %) составили женщины в пременопаузе, 47 (37,9 %) — женщины в постменопаузе. Полный патоморфологический ответ опухоли (pCR) достигнут у 58 (75,3 %) пременопаузальных пациентов, у 36 (76,6 %) — постменопаузальных (p>0,005). Частичный патоморфологический регресс достигнут у 19 (24,7 %) пременопаузальных, у 11 (23,4 %) постменопаузальных пациентов (Рис.1.).

Характеристика		Менопаузальный статус	
		Женщины в пременопаузе	Женщины в постменопаузе
Гормонотерапия	ИА	13 (16,9 %)	15 (31,9 %)
	Тамоксифен	30 (38,9 %)	4 (8,5 %)
	нет	34 (44,2 %)	28 (59,6 %)
Лучевая терапия	да	40 (51,9%)	39 (83,0 %)
	нет	37 (48,1 %)	8 (17,0 %)

3-летняя безрецидивная выживаемость составила 86,8 % (95 % ДИ 74,1–93,5) у пременопаузальных пациентов vs 90,5 % (95 % ДИ 73,2–96,9) в группе постменопаузальных. (рис. 2, табл. 2). Показатели безрецидивной выживаемости, оцененные с помощью теста отношения правдоподобия, не были статистически значимы ($p = 0,476$).

Обсуждение

В 2018 году было выявлено 2100000 новых случаев рака молочной железы. Согласно прогнозированию GLOBOCAN Cancer Tomorrow Международного Агентства по Изучению Рака (International Agency for Research on Cancer, IARC) ожидается, что число случаев заболевания увеличится более чем на 46 % к 2040 году [19]. Стандартизированный по возрасту показатель заболеваемости раком молочной железы в постменопаузе более чем в 10 раз выше, чем у женщин в пременопаузе. Около 645000 случаев РМЖ было выявлено у пременопаузальных женщин и 1400000 случаев у постменопаузальных женщин,

при этом в каждой менопаузальной группе произошло более 130000 и 490000 смертей соответственно [20].

Несмотря на большое количество исследований по эффективности системной терапии, исследований посвященных влиянию возрастного статуса на выживаемость ограничено. Nixon и соавт. провели ретроспективное исследование, где медиана наблюдения составила 8 лет. В группе пациентов моложе 35 лет отмечена более высокая частота местных рецидивов и худшая безрецидивная выживаемость ($p=0,03$), по сравнению с пациентами пожилого возраста [21]. Хотя есть утверждения, что у молодых пациентов заболевание протекает агрессивнее и показатели выживаемости у молодых пациентов ниже, чем у постменопаузальных, в нашем исследовании полный патоморфологический регресс при HER2-позитивном подтипе после НАХТ достигнут в равной степени в обеих группах, 75,3 % и 76,6 % соответственно. Показатели 3-летней безрецидивной выживаемости также достоверно не отличились (86,8 % и 90,5 %). Ограничениями нашего исследования является небольшое количество пациентов.

Заключение

Применение неоадьювантной химиотерапии и анти-HER2 двойной таргетной блокады, у пациентов с HER2-позитивным РМЖ, позволило достичь полный патоморфологический ответ у большинства пременопаузальных и постменопаузальных пациентов, 75,3 % и 76,6 %, соответственно ($p>0,005$). Достижение полного патоморфологического ответа опухоли (pCR) на НСТ как у пременопаузальных, так и постменопаузальных пациентов, «транслировалось» в высокие показатели 3-летней безрецидивной выживаемости.

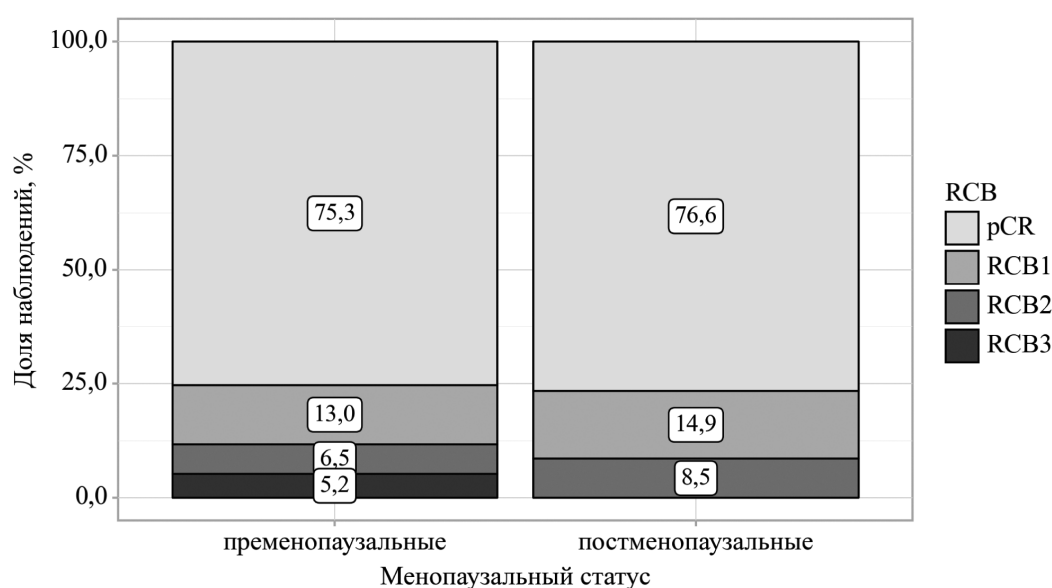
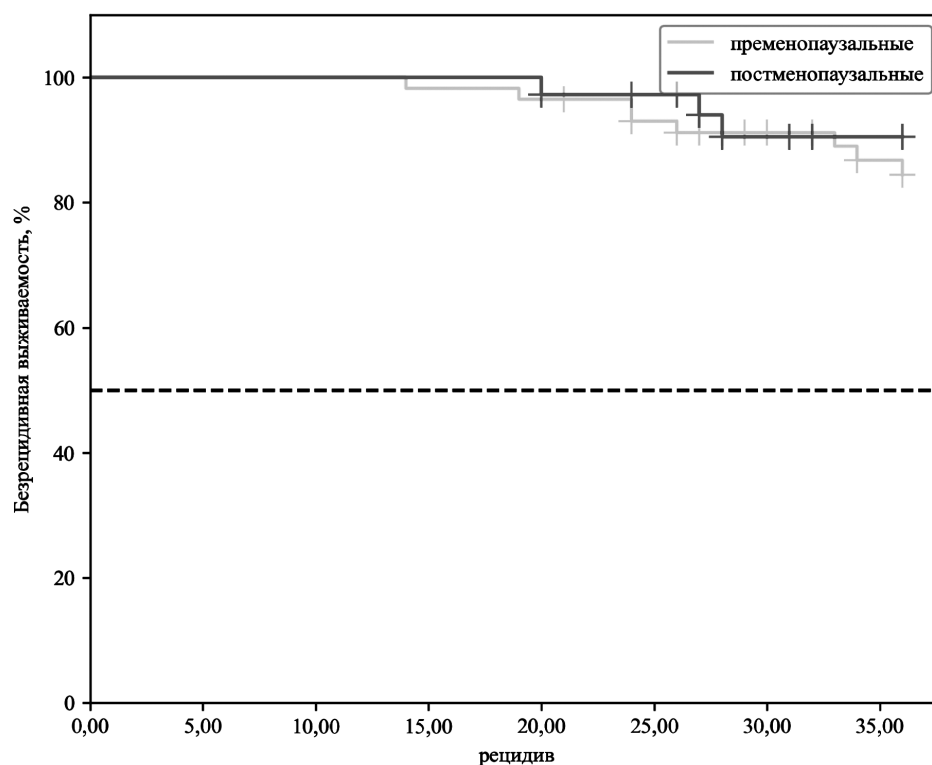


Рис. 1. Степень патоморфологического ответа по шкале оценки RCB, у пациентов с HER2-позитивным РМЖ после двойной таргетной терапии, в зависимости от менопаузального статуса



пременопаузальные								
Наблюдений	58	58	58	57	56	51	42	38
Цензурировано	0	0	0	0	0	3	11	13
Событий	0	0	0	1	2	4	5	7
постменопаузальные								
Наблюдений	36	36	36	34	31	24	22	22
Цензурировано	0	0	0	0	1	4	9	11
Событий	0	0	0	0	1	1	3	3

Рис. 2. Кривые безрецидивной выживаемости по Kaplan-Meier (3-летняя DFS) у пременопаузальных и постменопаузальных пациентов, достигших полный патоморфологический ответ (pCR) ($p = 0,476$)

Таблица 2.

Показатели 3-летней безрецидивной выживаемости у пременопаузальных и постменопаузальных пациентов, достигших полный патоморфологический ответ (pCR)

Время (месяцы)	пременопаузальные		постменопаузальные	
	DFS	95 % ДИ	DFS	95 % ДИ
10,0	100,0	100–100	100	100,0–100
15,0	98,3	88,4–99,8	100	100,0–100
20,0	96,6	86,9–99,1	97,2	81,9–99,6
25,0	93,0	82,5–97,3	97,2	81,9–99,6
30,0	91,2	80,2–96,2	90,5	73,2–96,9
35,0	86,8	74,1–93,5	90,5	73,2–96,9

ЛИТЕРАТУРА

1. Семиглазов В.Ф., Криворотко П.В., Беккелдиева Н.Б. и др. Трастузумаб дерукстекан в лечении рака молочной железы. 2023;11:109–112. <https://dx.doi.org/10.18565/pharmateca.2023.11.109-112>
2. Seshadri R, Firgaira FA, Horsfall DJ, et al: Clinical significance of HER-2/neu oncogene amplification in primary breast cancer. *J Clin Oncol* 11:1936–1942, 1993
3. Slamon DJ, Clark GM, Wong SG, et al: Human breast cancer: Correlation of relapse and survival with amplification of the HER-2/neu oncogene. *Science* 235:177–182, 1987
4. Pondé N, Brandão M, El-Hachem G, et al: Treatment of advanced HER2-positive breast cancer: 2018 And beyond. *Cancer Treat Rev* 67:10–20, 2018
5. Semiglazov V, Eiermann W, Zambetti M, et al. Surgery following neoadjuvant therapy in patients with HER2-positive locally advanced or inflammatory breast cancer participating in the NeOAdjuvant Herceptin (NOAH) study. *Eur J Surg Oncol.* 2011;37(10):856–863. doi:10.1016/j.ejso.2011.07.003
6. Gianni L, Eiermann W, Semiglazov V, et al. Neoadjuvant chemotherapy with trastuzumab followed by adjuvant trastuzumab versus neoadjuvant chemotherapy alone, in patients with HER2-positive locally advanced breast cancer (the NOAH trial): a randomised controlled superiority trial with a parallel HER2-negative cohort. *Lancet.* 2010;375(9712):377–384. doi:10.1016/S0140-6736(09)61964-4
7. Gianni L, Pienkowski T, Im YH, Laslo Roman, MD., V.Semiglazov. et al. Efficacy and safety of neoadjuvant pertuzumab and trastuzumab in women with locally advanced, inflammatory, or early HER2-positive breast cancer (NeoSphere): a randomised multicentre, open-label, phase 2 trial. *Lancet Oncol.* 2012;13(1):25–32. doi:10.1016/S1470-2045(11)70336-9
8. von Minckwitz G, Procter M, de Azambuja E, et al. Adjuvant Pertuzumab and Trastuzumab in Early HER2-Positive Breast Cancer [published correction appears in *N Engl J Med.* 2017 Aug 17;377(7):702] [published correction appears in *N Engl J Med.* 2018 Oct 18;379(16):1585]. *N Engl J Med.* 2017;377(2):122–131. doi:10.1056/NEJMoa1703643
9. Verma S, Miles D, Gianni L, Krop IE, Welslau M, Baselga J, Pegram M, Oh DY, Diéras V, Guardino E, Fang L, Lu MW, Olsen S, Blackwell K; EMILIA Study Group. Trastuzumab emtansine for HER2-positive advanced breast cancer. *N Engl J Med.* 2012 Nov 8;367(19):1783–91. doi: 10.1056/NEJMoa1209124. Epub 2012 Oct 1. Erratum in: *N Engl J Med.* 2013 Jun 20;368(25):2442. PMID: 23020162; PMCID: PMC5125250.
10. von Minckwitz G, Huang CS, Mano MS, et al. Trastuzumab Emtansine for Residual Invasive HER2-Positive Breast Cancer. *N Engl J Med.* 2019;380(7):617–628. doi:10.1056/NEJMoa1814017
11. Adami H.O., Malher B., Holmberg L., Persson I., Stone B. The relation between survival and age at diagnosis in breast cancer. *N Engl J Med.* Aug 28 1986;315(9):559–563. doi: 10.1056/nejm198608283150906.
12. SH Ahn, BH Son, SW Kim, et al: Poor outcome of hormone receptor-positive breast cancer at very young age is due to tamoxifen resistance: Nationwide survival data in Korea—A report from the Korean Breast Cancer Society *J Clin Oncol* 25: 2360–2368,2007
13. RR Love, NB Duc, NV Dinh, et al: Young age as an adverse prognostic factor in premenopausal women with operable breast cancer *Clin Breast Cancer* 2: 294—298,2002
14. CM Perou, T Sørlie, MB Eisen, et al: Molecular portraits of human breast tumours *Nature* 406: 747–752,2000
15. C. Fabio. et al. Evaluation of pathological complete response as surrogate endpoint in neoadjuvant randomised clinical trials of early stage breast cancer: systematic review and meta-analysis. *BMJ.* 2021 Dec 21;375:e066381. doi: 10.1136/bmj-2021-066381. PMID: 34933868; PMCID: PMC8689398.
16. Valenza C, Trapani D, Loibl S, Chia SKL, Burstein HJ, Curigliano G. Optimizing Postneoadjuvant Treatment in Patients With Early Breast Cancer Achieving Pathologic Complete Response. *J Clin Oncol.* 2024 Jul 10;42(20):2372–2376. doi: 10.1200/JCO.23.01935. Epub 2024 Apr 3. PMID: 38569132.
17. Huober J. et al. Identifying breast cancer patients at risk of relapse despite pathological complete response after neoadjuvant therapy. *NPJ Breast Cancer.* 2023 Apr 7;9(1):23. doi: 10.1038/s41523-023-00525-2. PMID: 37029138; PMCID: PMC10082019.
18. Squifflet P, Saad ED. et al. CTNeoBC Project. Re-Evaluation of Pathologic Complete Response as a Surrogate for Event-Free and Overall Survival in Human Epidermal Growth Factor Receptor 2-Positive, Early Breast Cancer Treated With Neoadjuvant Therapy Including Anti-Human Epidermal Growth Factor Receptor 2 Therapy. *J Clin Oncol.* 2023 Jun 1;41(16):2988–2997. doi: 10.1200/JCO.22.02363. Epub 2023 Mar 28. Erratum in: *J Clin Oncol.* 2024 Feb 1;42(4):486. doi: 10.1200/JCO.23.02620. PMID: 36977286.
19. Sung H. et al. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA Cancer J Clin.* 2021 May;71(3):209–249
20. Bray F. et al. Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J Clin.* 2018 Nov;68(6):394–424. doi: 10.3322/caac.21492. Epub 2018 Sep 12. Erratum in: *CA Cancer J Clin.* 2020 Jul;70(4):313. doi: 10.3322/caac.21609. PMID: 30207593
21. Nixon AJ. et al. Relationship of patient age to pathologic features of the tumor and prognosis for patients with stage I or II breast cancer. *JCO.* 1994;12(5):888–94.

© Беккелдиева Нестан Беккелдиевна (bekkeldiyeva.n@bk.ru); Семиглазов Владимир Федорович (vsemiglazov@mail.ru); Криворотко Петр Владимирович (dr.krivorotko@mail.ru); Зернов Константин Юрьевич (konstantin_zernov@hotmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ В ДИАГНОСТИКЕ ЭНДОМЕТРИОЗА

MACHINE LEARNING IN THE DIAGNOSIS OF ENDOMETRIOSIS

A. Rusinova

Summary. This article examines the application of machine learning methods in the diagnosis of endometriosis, highlighting the current state of research, achievements, and potential directions for further work. Endometriosis is a chronic condition that significantly affects women's morbidity and quality of life. Traditional diagnostic methods, including imaging and invasive procedures, have their limitations, emphasizing the need for the integration of modern technologies. The main machine learning algorithms used for analyzing medical data are discussed, including classification, regression, and clustering methods. Factors contributing to the successful diagnosis of endometriosis are identified, such as the volume and quality of data, as well as approaches to data processing and analysis. In conclusion, it is noted that machine learning can significantly improve the accuracy of endometriosis diagnosis; however, more clinical trials and standards are needed to achieve clinical practice.

Keywords: endometriosis, machine learning, diagnostics, noninvasive diagnostics, algorithms, medical data, chronic disease.

Русинова Анастасия Константиновна

Врач акушер-гинеколог, БУЗ ВО Воронежская областная
клиническая больница №1
rusiknastya@mail.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается применение методов машинного обучения в диагностике эндометриоза, освещая текущее состояние исследований, их достижения и потенциальные направления для дальнейшей работы. Эндометриоз — это хроническое заболевание, сопровождающееся значительной заболеваемостью и ухудшением качества жизни женщин. Традиционные методы диагностики, включая визуализацию и инвазивные процедуры, имеют свои ограничения, что подчеркивает необходимость внедрения современных технологий. Обсуждаются основные алгоритмы машинного обучения, применяемые для анализа медицинских данных, включая методы классификации, регрессии и кластеризации. Выявлены факторы, способствующие успешной диагностики эндометриоза, такие как объем и качество данных, а также подходы к обработке и анализу информации. В заключение отмечается, что машинное обучение может существенно улучшить точность диагностики эндометриоза, однако для достижения клинической практики необходимо больше клинических испытаний и стандартов.

Ключевые слова: эндометриоз, машинное обучение, диагностика, неинвазивная диагностика, алгоритмы, медицинские данные, хроническое заболевание.

Проблема эндометриоза изучается уже более 150 лет. Первое документированное упоминание о наличии эктопически расположенной ткани, аналогичной эндометрию, относится к 1854 году (Muller H., 1854). В 1860 году С. Von Rokitansky впервые описал микроскопические изменения, связанные с эндометриозом, включая присутствие желез эндометрия и стромы в патологических образованиях женских репродуктивных органов, и опубликовал данные об обнаружении таких очагов. Все последующие исследования по этой теме представляют собой, по сути, накопление оригинальных данных и попытки их систематизации и анализа.

Термин «эндометриоз» был введен В. Bell в 1892 году (Баскаков В.П. и др., 2002; Андреева Е.Н., Гаврилова Е.Ф., 2007), в то время как термин «аденомиоз» был представлен ранее, в 1860 году С. Von Rokitansky (Рухляда Н.Н., 2004). На сегодняшний день — более чем через век — многие специалисты рассматривают эти два состояния как полностью независимые.

По клиническим рекомендациям Министерства здравоохранения Российской Федерации 2024 года эндометриоз определяется как патологический процесс, в рамках которого обнаруживается ткань, морфологи-

чески и функционально схожая с эндометрием, вне полости матки [1]. Некоторые зарубежные исследователи также определяют эндометриоз как наличие подобной эндометрию ткани вне матки, однако такое определение не учитывает сложный симптоматический, патофизиологический и полисистемный характер этого состояния [2].

Многие авторы описывают эндометриоз как патологический рост ткани эндометрия вне матки, где эндометриозидные стромы и железы могут встречаться в брюшной полости, включая яичники, фаллопиевы трубы, заднюю стенку мочевого пузыря, сам мочевой пузырь и кишечник [3]. В России В.П. Баскаков считается пионером в изучении эндометриоза. В аннотации к его первой монографии «Эндометриозы» (1966) он отметил, что работа «посвящена малоизвестному, но достаточно распространенному заболеванию».

С тех пор подход к оценке распространенности и значимости этого заболевания претерпел значительные изменения. В современности эндометриоз признается одним из самых распространенных гинекологических заболеваний среди женщин репродуктивного возраста (Бек У. и др., 1997; Вихляева Е.М., Железнов Б.И., 1998; Сметник В.П., Тумилович Л.Г., 2001). Тем не менее, знания

о данной патологии находятся на уровне, сопоставимом с состоянием дел пятидесятилетней давности.

Согласно статистическим оценкам, эндометриоз затрагивает около 10 % женщин репродуктивного возраста, что составляет около 190 миллионов женщин в мире, согласно оценкам Всемирного банка за 2017 год [4,5]. Однако истинная распространенность этого заболевания остается неопределенной, поскольку окончательный диагноз требует хирургической визуализации. Оценки распространенности значительно варьируются в зависимости от исследуемой группы и диагностических методов [6].

Распространенность эндометриоза варьируется от 2 до 11 % среди бессимптомных женщин, от 5 до 50 % среди женщин с бесплодием и от 5 до 21 % среди лиц, госпитализированных с тазовой болью [4]. К традиционным эмбриональным, метапластическим и имплантационным теориям добавлены многочисленные исследования иммунологических нарушений и генетических факторов (Адамян Л.В. и др., 1998; Баскаков В.П. и др., 2002). Важную роль в патогенезе эндометриоза играют различные тканевые регуляторы (Бурлев В.А. и др., 2006; Ляшенко А.А. и др., 2006). Некоторые исследователи утверждают, что эндометриоз, в частности наружный генитальный, может рассматриваться как болезнь цивилизации (Вихляева Е.М., Железнов Б.И., 1998; Линде В.А., Татарова Н.А., 2005). Имеются данные, позволяющие рассматривать аденомиоз и наружный генитальный эндометриоз как независимые патологические процессы (Адамян Л.В. и др., 2006). Однако многие вопросы этиопатогенеза остаются нерешенными.

Симптомы эндометриоза могут варьироваться от легких до тяжелых. У женщин с минимальными или незначительными симптомами диагноз может быть поставлен слишком поздно, что затрудняет своевременное лечение [7]. Согласно литературным данным, эндометриоз диагностируется у 15–80 % женщин, которые прошли лапароскопическое вмешательство по поводу хронической тазовой боли. Основные жалобы пациенток с эндометриозом включают болевой синдром, проявляющийся дисменореей, диспареунией, хронической тазовой болью, дизурией и дисхезией [8]. Исследования показывают, что половина женщин, перенесших операцию по поводу эндометриоза, продолжают испытывать диспареунию, что негативно сказывается на их сексуальной жизни и отношениях с партнерами [9]. Анализ субъективной оценки здоровья по восьми ключевым аспектам показал значительное снижение общего здоровья у пациенток с эндометриозом по сравнению с контрольной группой [10].

По данным опубликованных исследований, заболеваемость эндометриозом в России за десять лет (с 1999

по 2009) увеличилась на 73 %, что связано как с улучшением диагностики, так и с возрастанием частоты лапароскопических операций. Подобные тенденции фиксируются и в других странах [11]. В США более 5 миллионов женщин страдают от эндометриоза [12]. По различным оценкам, данный диагноз чаще ставят женщинам в возрасте 25–34 лет, однако в последние годы болезнь все чаще выявляется и у подростков (11–14 лет), составляющих около 6 % всех пациенток [13]. Учитывая, что согласно современным данным, почти две трети пациенток с эндометриозом моложе 30 лет, органосберегающие стратегии лечения становятся приоритетными [14]. Также важен вопрос выбора терапии бесплодия у женщин старшего репродуктивного возраста или с хирургическими вмешательствами на яичниках в анамнезе, особенно с учетом снижения овариального резерва [15–19]. Наличие наружного генитального эндометриоза представляет собой сложную задачу для специалистов при выборе тактики ведения пациенток, особенно если имеется бесплодие и сниженный овариальный резерв.

Ход заболевания эндометриозом обычно негативно сказывается на психологическом состоянии, сексуальном здоровье, качестве жизни и социальной адаптации женщин. Биопсихосоциальная модель, которая интегрирует представления о соматических симптомах с данными из области психологии и нейробиологии, предполагает междисциплинарный подход к терапии данной патологии. Пограничные психические расстройства не специфичны для эндометриоза и могут быть следствием особенностей клинической картины. На фоне хронического болевого синдрома нередко развивается соматогенная депрессия. В зависимости от интенсивности болевого синдрома эмоционально-аффективные расстройства могут достигать субклинического уровня с легким снижением настроения и проявлениями тревоги относительно здоровья и будущего. В более серьезных случаях могут формироваться астенодепрессивные и астеноипохондрические синдромы, сопровождающиеся гиперестезией, раздражительной слабостью и повышенной утомляемостью. При развитии депрессивно-ипохондрического синдрома наблюдается выраженное снижение настроения с возможной суточной динамикой, ангедония и даже суицидальные мысли. Проблема бесплодия, часто связанная с эндометриозом, становится источником постоянной тревоги. У женщин отмечают изолированные или смешанные тревожные и депрессивные расстройства. Среди половых расстройств при эндометриозе наиболее характерна глубокая диспареуния, что может привести к снижению либидо, нарушению оргазма и возбуждения, а также к сниженной психологической удовлетворенности. Сексуальная патология усугубляется на фоне депрессивных состояний.

Некоторые исследователи поднимают вопросы, касающиеся психоземotionalного состояния, что высоко

обосновано, поскольку ключевой проблемой пациенток с эндометриозом является хроническая тазовая боль, которая существенно влияет на качество жизни женщин [20]. На самом деле, распространенность эндометриоза у женщин, страдающих от хронической тазовой боли, достигает 70 % [21].

Многоцентровое исследование, посвященное профессиональной деятельности пациенток с эндометриозом, показало, что симптомы заболевания негативно сказываются на продуктивности труда, эквивалентно потере около одного рабочего дня в неделю [22]. В другом исследовании 85 % пациенток с эндометриозом отметили заметное снижение качества своей работы, 19 % заявили, что не могут работать из-за боли, а 69 % продолжали трудиться, несмотря на болезненные ощущения [23].

Воспаление и иннервация в зонах эндометриозных поражений рассматриваются как причины тазовой боли [24]. Считается, что простагландин E2 (PGE2), ключевой медиатор воспаления и повышенной чувствительности к боли, играет важную роль в патогенезе эндометриоза [25]. Недавние исследования показали, что боль может быть связана с нервными волокнами и нейротрофическими факторами в очагах эндометриоза [26]. Несколько работ продемонстрировали наличие нейротрофических факторов, таких как фактор роста нервов (NGF), нейротрофин-3/5 (NT-3/5) и нейротрофический фактор головного мозга (BDNF) в эндометриозных имплантатах, эндометриозных кистах яичников и перитонеальной жидкости у страдающих эндометриозом.

Расходы на лечение эндометриоза, включая хирургическое удаление образований и гормональные препараты, часто вызывающие побочные эффекты и имеющие переменную эффективность, составляют примерно 4000 долларов на одну женщину, что сопоставимо с затратами на лечение других хронических заболеваний, таких как диабет 2 типа, болезнь Крона и ревматоидный артрит [27].

Расходы на лечение симптомов, таких как хроническая тазовая боль, дисменорея, глубокая диспареуния, дизурия, дисхезия, утомляемость и бесплодие, значительно превышают затраты на лечение эндометриоза, так как эти симптомы затрагивают физическое, психическое, сексуальное и социальное благополучие, а также продуктивность [28-30].

Классификация эндометриоза по четырем основным направлениям:

1. По локализации
2. По формам генитального эндометриоза
3. По степени тяжести отдельных форм
4. Количественные классификации, преимущественно для эндовидеохирургического пользования.

Изменение взглядов на частоту и значение эндометриоза для женщин репродуктивного возраста связано с прогрессом в области диагностических возможностей в медицине, и в гинекологии, в частности. До середины 1960-х годов диагноз ставился в основном на основе морфологического анализа хирургического и секционного материала (Баскаков В.П. и др., 2002). В период с середины 70-х до середины 80-х годов основной прогресс в диагностике как аденомиоза, так и наружного генитального эндометриоза был достигнут благодаря широкому применению гистеросальпингографии в гинекологической практике с использованием водорастворимых рентгеноконтрастных веществ (Баскаков В.П., 1990).

Позже, вначале в западных странах, а затем и в СССР, улучшение диагностики эндометриоза стало зависеть от внедрения и развития УЗИ и различных эндовидеохирургических методов (Стрижаков А.Н., Давыдов А.И., 1996а; Адамян Л.В. и др., 2006). В настоящее время эти методы продолжают расширяться, хотя их возможности остаются ограниченными. Дальнейшее улучшение диагностических методов может быть связано с более широким внедрением и совершенствованием таких технологий, как КТ и МРТ.

Традиционная диагностика эндометриоза включает клинические методы, такие как сбор анамнеза, и инструментальные исследования, такие как ультразвуковое исследование и лапароскопия. Однако эти методы имеют ограничения и могут не всегда быть достоверными для своевременного выявления заболевания. Например, лапароскопия является инвазивной процедурой, требующей хирургического вмешательства и общего наркоза, что не всегда оправданно.

На данный момент не существует неинвазивных методов, способных надежно диагностировать или стадировать эндометриоз. Лапароскопия с гистологической верификацией остается «золотым стандартом» диагностики эндометриоза. Она позволяет подтвердить наличие заболевания через прямую визуализацию, определить клинические формы и степень распространенности, выявить инфильтративный эндометриоз и эндометриомы, а также сопутствующие заболевания. С использованием биопсии ткани и морфологического исследования образца можно оценить агрессивность поражений и возможность назначения медикаментозного лечения. В настоящее время диагностическая лапароскопия чаще используется как оперативное вмешательство.

Ранее диагноз эндометриоза устанавливался во время лапаротомии, однако сегодня лапароскопия предоставляет возможность для обследования органов брюшной полости и малого таза, что позволяет визуализировать эндометриозные гетеротопии, их иссечение и последующее гистологическое исследование. Это,

в свою очередь, ведет к более точной постановке диагноза и определению типа и стадии заболевания [31–34].

Диагностическая лапароскопия начала развиваться в начале XX века, но прибавила клиническое значение примерно 60 лет назад благодаря появлению холодного источника света и стержневой линзовой системы Hopkins [35, 36]. В Европе гинекологическую лапароскопию начали применять с 1930-х годов благодаря новаторским исследованиям Raoul Palmer (Франция), Hans Fraugenhain (Германия) и Patrick Steptoe (Англия).

В России развитие лапароскопии стартовало в начале XX века благодаря работам петербургского гинеколога Д.О. Оттом, который назвал свою методику вентроскопией. В 1910 году был введен термин «лапароскопия», который сохранился и используется до сих пор. Метод постепенно развивался, с появлением новых инструментов и совершенствованием техники. В 1937 году Andersen впервые успешно выполнил лапароскопическую стерилизацию. Позже лапароскопия начала активно развиваться в Северной Америке благодаря Jordan M. Phillips, который в 1971 году основал Американскую ассоциацию гинекологических лапароскопистов.

В 1973 году Shapiro и Adler впервые провели органосохраняющую операцию при трубной беременности. Однако основоположником гинекологической лапароскопии по праву считается Kurt Semm, который разработал важнейшие принципы лапароскопии в гинекологии, создал множество инструментов и показал, что этот метод безопасен, экономически целесообразен и менее травматичен по сравнению с традиционной лапаротомией. В 1975 году был опубликован значительный труд Semm под названием «Атлас гинекологической лапароскопии и гистероскопии», который помог преодолеть недоверие к этой методике — осложнения при его вмешательствах составляли всего 0,28 %.

На международной арене активно проводится работа по повышению осведомленности, диагностике и лечению эндометриоза. Глобальный консорциум исследователей эндометриоза недавно опубликовал свои рекомендации, определив приоритетные направления исследований и обозначив необходимость разработки неинвазивного инструмента скрининга для улучшения диагностики.

Диагностика эндометриоза включает гинекологический осмотр, ультразвуковое исследование, МРТ и лапароскопию, однако эти методы являются дорогостоящими и инвазивными, требуют участия специалистов. В литературе подчеркивается необходимость неинвазивных инструментов скрининга для упрощения диагностического процесса и сокращения времени до постановки диагноза, а также для уменьшения количества женщин, подвергающихся хирургическому вмешательству.

Некоторые исследования исследовали возможность применения неинвазивных инструментов, включая биомаркеры, полученные из анализов крови. Например, Низенблат и др. проанализировали работы, в которых неинвазивные анализы крови сочетались с трансвагинальным ультразвуком для улучшения точности диагностики эндометриоза органов малого таза. Однако точность, достигнутая в этих исследованиях, оказалась недостаточной для замены лапароскопии. Рассматривались различные биомаркеры, такие как CA-125 и показатели эндометрия (плотность нервных волокон), которые показали разные уровни точности и потенциальной клинической полезности. Тем не менее, эти процедуры часто недостаточно точно предсказывают эндометриоз и сами по себе являются инвазивными или полуинвазивными [37,38].

Другим неинвазивным инструментом для предсказания эндометриоза являются геномные данные. Исследования выявили несколько биомаркеров генов, ассоциированных с эндометриозом, и разработали модели на основе машинного обучения для его предсказания. Использование симптомов, о которых сообщают пациентки, также представляет собой неинвазивный подход, однако многие из существующих исследований включали не только указанные симптомы, но и визуализацию и клинические параметры, которые доступны лишь на более поздних стадиях диагностики и часто требуют значительных затрат.

Обзорное исследование Surrey и др. выявило только одно исследование, в котором использовался опросник, основанный исключительно на сообщаемых пациентами симптомах. В этом исследовании применялась множественная логистическая регрессия для анализа данных женщин репродуктивного возраста, перенесших лапароскопию, с целью выявления связей между их симптомами и эндометриозом. Выяснили, что только один симптом — менструальная боль — значительно отличался у женщин с диагнозом эндометриоз от здоровых.

Машинное обучение может значительно упростить диагностику эндометриоза благодаря своей способности обрабатывать и анализировать большие объемы данных. Алгоритмы способны интегрировать многочисленные факторы, включая медицинские изображения, результаты лабораторных тестов и данные анамнеза каждой пациентки, что позволяет формировать более точное представление о состоянии здоровья и вероятности наличия эндометриоза (Basta et al., 2020) [39].

Один из ключевых аспектов успешного применения машинного обучения заключается в сборе качественных данных. Данные о здоровье женщин с эндометриозом должны быть обширными и разнообразными, включая клиническую информацию, результаты визуализации,

генетическую информацию и данные об образе жизни (Sinha et al., 2024) [40]. Стандартизированные данные о симптомах, такие как оценки боли по визуально-аналоговой шкале (ВАШ), критически важны для разработки надежных моделей (Miller et al., 2024) [41].

В настоящее время активно развиваются базы данных и платформы, специально созданные для хранения медицинской информации. Эти данные могут быть использованы для анализа с применением глубоких нейросетей и других методов машинного обучения. Платформы могут быть интегрированы с существующими электронными медицинскими картами для удобного доступа к информации как для врачей, так и для исследователей (Chen et al., 2021) [42].

Среди успешных примеров применения машинного обучения в диагностике эндометриоза можно упомянуть исследования, использующие алгоритмы глубокого обучения для анализа ультразвуковых изображений. Эти исследования показали, что нейронные сети эффективнее выявляют эндометриоз на ранних стадиях, существенно повышая вероятность правильной диагностики по сравнению с традиционными методами (Kumar et al., 2020) [43].

Одним из примеров является использование моделей, обученных на обширных наборах данных, собранных из различных медицинских учреждений. В этих исследованиях принимали участие как пациентки с диагностированным эндометриозом, так и контрольные группы, что позволило оценить эффективность алгоритмов не только для диагностики, но и для прогнозирования прогрессирования заболевания (Nguyen et al., 2021) [44].

Имеются также примеры использования машинного обучения для анализа данных о репродуктивной функции, что позволяет прогнозировать результаты для женщин с эндометриозом. Алгоритмы могут учитывать различные факторы, такие как возраст, генетические предрасположенности и результаты предыдущих исследований, чтобы предложить персонализированные лечебные планы (Rakhshan et al., 2022) [45].

С внедрением машинного обучения в медицинскую практику возникают важные вопросы о защите конфиденциальности и безопасности данных пациентов. Сбор и использование медицинских данных должны соответствовать этическим и правовым нормам (Cohen et al., 2021) [46]. Разработка норм и стандартов, касающихся сбора, хранения и использования данных, станет необходимым шагом для обеспечения доверия со стороны пациентов к новым технологиям.

Врачи и исследователи должны быть готовы обсуждать этические аспекты, такие как права пациентов

на свои данные и их использование без согласия. Это включает необходимость получения информированного согласия от пациентов на использование их данных для обучения и разработки алгоритмов.

Исследования, такие как [Vercellini et al., 2014], подчеркивают важность дальнейших исследований для улучшения понимания, диагностики и лечения эндометриоза, предлагая возможность интеграции решений на основе машинного обучения в клиническую практику [47].

Недавние достижения в области искусственного интеллекта (ИИ), машинного обучения (Machine Learning, ML) и глубокого обучения (Deep Learning, DL) обещают внести значительный вклад в решение ряда распространённых медицинских проблем, включая эндометриоз. Кроме того, смартфоны исследуются не только как средство связи между медицинскими специалистами и пациентами, но и как инструменты для сбора и анализа данных. С помощью этих мобильных технологий пациенты могут предоставлять долгосрочные и актуальные данные о своем опыте.

В последние годы машинное обучение зарекомендовало себя как перспективный инструмент для классификации пациентов, демонстрируя высокие результаты в различных медицинских областях. Оно также может быть использовано для диагностики эндометриоза, поскольку позволяет выявлять сложные нелинейные зависимости между набором переменных (такими как характеристики пациента или симптомы) и целевой переменной (например, вероятностью наличия эндометриоза).

Недавний обзор, проведенный Sivajohan et al., охватывал 36 исследований, где машинное обучение применялось для прогноза, диагностики и исследования эндометриоза [48–51]. Из них только три работы использовали опросники для разработки моделей прогнозирования на основе машинного обучения. Однако, помимо опросников, эти модели также включали клинические данные женщин, уже прошедших диагностику эндометриоза, либо после лапароскопии с подтвержденным диагнозом, либо ожидающих её.

Основные модели машинного обучения:

1. Логистическая регрессия (Logistic Regression) — это статистическая модель, использующая логистическую функцию для моделирования бинарной зависимой переменной. Математически, бинарная логистическая модель имеет зависимую переменную с двумя возможными значениями, обозначаемыми как «0» и «1». Для выходных данных с более чем двумя значениями применяется мультиномиальная логистическая регрессия. Этот метод используется в различных областях, таких как здравоохранение и социальные науки.

2. Дерево решений (Decision Tree) — это простая и мощная модель машинного обучения, которая использует доступную информацию для нахождения оптимального класса для набора данных. Эти классы становятся узлами дерева решений, которое затем разрастается в древовидную структуру. Модель дерева решений уже успешно применялась в исследованиях общественного здравоохранения и в области поведенческих наук.
3. Классификатор случайного леса (Random Forest) — ансамблевый метод, обучающий несколько деревьев решений параллельно, что называется «бэггинг». Различные деревья решений обучаются на различных подмножествах данных и с использованием разных подмножеств доступных функций. Это гарантирует уникальность каждого дерева, что способствует снижению общей дисперсии классификатора и улучшению его обобщающих способностей.
4. Экстремальное повышение градиента (eXtreme Gradient Boosting) — алгоритм повышения градиента, который сочетает несколько слабых моделей прогнозирования, преимущественно деревьев решений. Хотя отдельные деревья просто и часто ненадежны, их объединение обеспечивает надежный алгоритм. Модель начинается с простого дерева и последовательно дорабатывается, основываясь на менее эффективных «учениках», в каждой итерации оптимизируя предыдущее дерево.
5. Алгоритм классификатора голосования — это модель машинного обучения, обучающаяся на множестве моделей и прогнозирующая результат (класс) на основе самой вероятной категории. Она объединяет результаты всех классификаторов

и выбирает класс, получивший наибольшее количество голосов. Этот классификатор поддерживает два типа голосования: жесткое голосование, где итоговый класс — это класс с наибольшим числом голосов, и мягкое голосование, при котором основанное на вероятности прогнозы используется для выбора класса.

6. Тест Хи-квадрат — один из наиболее распространенных непараметрических тестов, часто используемый для проверки независимости между наблюдаемыми и ожидаемыми частотами одного или нескольких атрибутов в таблице сопряженности.

Заключение

Внедрение методов машинного обучения в диагностику эндометриоза открывает новые горизонты для улучшения клинической практики и повышения качества обслуживания пациенток. Несвоевременная диагностика и недостаточная точность традиционных методов могут привести к серьезным последствиям для здоровья женщин, включая хроническую боль и бесплодие. Применение машинного обучения позволяет значительно повысить точность диагностики, благодаря более глубокому анализу больших объемов данных и выявлению скрытых паттернов. Мультидисциплинарный подход, а также использование современных алгоритмов для обработки медицинских данных, может обеспечить раннее выявление эндометриоза и, следовательно, более эффективные стратегии лечения. В результате это не только увеличивает шансы на благоприятный исход для здоровья пациенток, но и способствует улучшению их качества жизни.

ЛИТЕРАТУРА

1. Министерство здравоохранения Российской Федерации. Эндометриоз. Клинические рекомендации. М.; 2024.
2. Knapp V.J. (1999). How old is endometriosis? Late 17th— and 18th-century European descriptions of the disease. *Fertility and sterility*, 72(1), 10–14. [https://doi.org/10.1016/s0015-0282\(99\)00196-x](https://doi.org/10.1016/s0015-0282(99)00196-x)
3. Ezzati M., & Carr B.R. (2015). Elagolix, a novel, orally bioavailable GnRH antagonist under investigation for the treatment of endometriosis-related pain. *Women's Health*, 11, 19–28. <https://doi.org/10.2217/WHE.14.68>
4. Shafir A.L., Farland L.V., Shah D.K., Harris H.R., Kvaskoff M., Zondervan K., & Missmer S.A. (2018). Risk for and consequences of endometriosis: A critical epidemiologic review. *Best practice & research. Clinical obstetrics & gynaecology*, 51, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.bpobgyn.2018.06.001>
5. The World Bank. Population ages 15–64 (% of population). 2017 (<https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.1564.TO.ZS>)
6. Agarwal S.K., Chapron C., Giudice L.C., Laufer M.R., Leyland N., Missmer S.A., Singh S.S., & Taylor H.S. (2019). Clinical diagnosis of endometriosis: a call to action. *American journal of obstetrics and gynecology*, 220(4), 354.e1–354.e12. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2018.12.039>
7. Taylor H.S. (2018). Use of Elagolix in Gynaecology. *Journal of obstetrics and gynaecology Canada: JOGC = Journal d'obstetrique et gynecologie du Canada: JOGC*, 40(7), 931–934. <https://doi.org/10.1016/j.jogc.2018.01.004>
8. Kennedy S., Bergqvist A., Chapron C., D'Hooghe T., Dunselman G., Greb R., Hummelshoj L., Prentice A., Saridogan E., & ESHRE Special Interest Group for Endometriosis and Endometrium Guideline Development Group (2005). ESHRE guideline for the diagnosis and treatment of endometriosis. *Human reproduction (Oxford, England)*, 20(10), 2698–2704. <https://doi.org/10.1093/humrep/dei135>
9. De Graaff A.A., D'Hooghe T.M., Dunselman G.A., Dirksen C.D., Hummelshoj L., WERF EndoCost Consortium, & Simoons-Smit A.M. (2013). The significant effect of endometriosis on physical, mental, and social wellbeing: results from an international cross-sectional survey. *Human reproduction (Oxford, England)*, 28(10), 2677–2685. <https://doi.org/10.1093/humrep/det284>

10. Juan J., Estiarte R., Colomé E., Artés M., Jiménez F.J., & Alonso J. (2003). Burden of illness of Crohn's disease in Spain. Digestive and liver disease: official journal of the Italian Society of Gastroenterology and the Italian Association for the Study of the Liver, 35(12), 853–861. <https://doi.org/10.1016/j.dld.2003.07.002>
11. Основные показатели деятельности службы охраны здоровья матери и ребенка в РФ. Москва, 2013. 50 с.
12. Kennedy S., Bergqvist A., Chapron C., D'Hooghe T., Dunselman G., Greb R., Hummelshoj L., Prentice A., Saridogan E., & ESHRE Special Interest Group for Endometriosis and Endometrium Guideline Development Group (2005). ESHRE guideline for the diagnosis and treatment of endometriosis. Human reproduction (Oxford, England), 20(10), 2698–2704. <https://doi.org/10.1093/humrep/dei135>
13. Леваков С.А., Хамошина М.Б. Эндометриоз: мировой прорыв в медикаментозном лечении. Москва. Редакция журнала StatusPraesens, 2012. 16 с.
14. Arruda M.S., Petta C.A., Abrão M.S., & Benetti-Pinto C.L. (2003). Time elapsed from onset of symptoms to diagnosis of endometriosis in a cohort study of Brazilian women. Human reproduction (Oxford, England), 18(4), 756–759. <https://doi.org/10.1093/humrep/deg136>
15. Бокгалова Ю.В. Коррекция репродуктивной функции у женщин после органосохраняющих операций на внутренних половых органах: автореф. дис. ... канд. мед. наук. Москва, 2012. 20 с.
16. Боярский К.Ю., Гайдуков С.Н. Патофизиологические механизмы работы репродуктивной функции женщины после 40 лет // Проблемы репродукции. 2011. № 3. С. 6–15.
17. Raffi F., Metwally M., & Amer S. (2012). The impact of excision of ovarian endometrioma on ovarian reserve: a systematic review and meta-analysis. The Journal of clinical endocrinology and metabolism, 97(9), 3146–3154. <https://doi.org/10.1210/jc.2012-1558>
18. Somigliana E., Benaglia L., Viganò P., Candiani M., Vercellini P., & Fedele L. (2011). Surgical measures for endometriosis-related infertility: a plea for research. Placenta, 32 Suppl 3, S238–S242. <https://doi.org/10.1016/j.placenta.2011.06.011>
19. Беженарь В.Ф., Ярмолинская М.И. и др. Сравнение эффективности различных схем гормономодулирующей терапии после хирургического лечения наружного генитального эндометриоза // Проблемы репродукции. 2015. № 4. С. 89–98.
20. Alvarez P., & Levine J.D. (2014). Screening the role of pronociceptive molecules in a rodent model of endometriosis pain. The journal of pain, 15(7), 726–733. <https://doi.org/10.1016/j.jpain.2014.04.002>
21. Practice Committee of American Society for Reproductive Medicine (2008). Treatment of pelvic pain associated with endometriosis. Fertility and sterility, 90 (5 Suppl), S260–S269. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2008.08.057>
22. Nnoaham K.E., Hummelshoj L., Webster P., d'Hooghe T., de Cicco Nardone F., de Cicco Nardone C., Jenkinson C., Kennedy S.H., Zondervan K.T., & World Endometriosis Research Foundation Global Study of Women's Health consortium (2011). Impact of endometriosis on quality of life and work productivity: a multicenter study across ten countries. Fertility and sterility, 96(2), 366–373.e8. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2011.05.090>
23. Fourquet J., Gao X., Zavala D., Orengo J.C., Abac S., Ruiz A., Laboy J., & Flores I. (2010). Patients' report on how endometriosis affects health, work, and daily life. Fertility and sterility, 93(7), 2424–2428. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2009.09.017>
24. Fassbender A., Burney R.O., O.D.F., D'Hooghe T., & Giudice L. (2015). Update on Biomarkers for the Detection of Endometriosis. BioMed research international, 2015, 130854. <https://doi.org/10.1155/2015/130854>
25. Wu M.H., Lu C.W., Chuang P.C., & Tsai S.J. (2010). Prostaglandin E2: the master of endometriosis? Experimental biology and medicine (Maywood, N.J.), 235(6), 668–677. <https://doi.org/10.1258/ebm.2010.009321>
26. Morotti M., Vincent K., Brawn J., Zondervan K.T., & Becker C.M. (2014). Peripheral changes in endometriosis-associated pain. Human reproduction update, 20(5), 717–736. <https://doi.org/10.1093/humupd/dmu021>
27. Simoons S., Dunselman G., Dirksen C., Hummelshoj L., Bokor A., Brandes I., Brodsky V., Canis M., Colombo G.L., DeLeire T., Falcone T., Graham B., Halis G., Horne A., Kanj O., Kjer J.J., Kristensen J., Lebovic D., Mueller M., Viganò P., ... D'Hooghe T. (2012). The burden of endometriosis: costs and quality of life of women with endometriosis and treated in referral centres. Human reproduction (Oxford, England), 27(5), 1292–1299. <https://doi.org/10.1093/humrep/des073>
28. Gallagher J.S., DiVasta A.D., Vitonis A.F., Sarda V., Laufer M.R., & Missmer S.A. (2018). The Impact of Endometriosis on Quality of Life in Adolescents. The Journal of adolescent health: official publication of the Society for Adolescent Medicine, 63(6), 766–772. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2018.06.027>
29. Nnoaham K.E., Hummelshoj L., Webster P., d'Hooghe T., de Cicco Nardone F., de Cicco Nardone C., Jenkinson C., Kennedy S.H., Zondervan K.T., & World Endometriosis Research Foundation Global Study of Women's Health consortium (2011). Impact of endometriosis on quality of life and work productivity: a multicenter study across ten countries. Fertility and sterility, 96(2), 366–373.e8. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2011.05.090>
30. Rush G., Misajon R., Hunter J.A., Gardner J., & O'Brien K.S. (2019). The relationship between endometriosis-related pelvic pain and symptom frequency, and subjective wellbeing. Health and quality of life outcomes, 17(1), 123. <https://doi.org/10.1186/s12955-019-1185-y>
31. Jansen R.P., & Russell P. (1986). Nonpigmented endometriosis: clinical, laparoscopic, and pathologic definition. American journal of obstetrics and gynecology, 155(6), 1154–1159. [https://doi.org/10.1016/0002-9378\(86\)90136-5](https://doi.org/10.1016/0002-9378(86)90136-5)
32. Stripling M.C., Martin D.C., Chatman D.L., Zwaag R.V., & Poston W.M. (1988). Subtle appearance of pelvic endometriosis. Fertility and sterility, 49(3), 427–431. [https://doi.org/10.1016/s0015-0282\(16\)59767-2](https://doi.org/10.1016/s0015-0282(16)59767-2)
33. Wiegerinck M.A., Van Dop P.A., & Brosens I.A. (1993). The staging of peritoneal endometriosis by the type of active lesion in addition to the revised American Fertility Society classification. Fertility and sterility, 60(3), 461–464. [https://doi.org/10.1016/s0015-0282\(16\)56161-5](https://doi.org/10.1016/s0015-0282(16)56161-5)
34. Revised American Fertility Society classification of endometriosis: 1985. (1985). Fertility and sterility, 43(3), 351–352. [https://doi.org/10.1016/s0015-0282\(16\)48430-x](https://doi.org/10.1016/s0015-0282(16)48430-x)
35. Fourestiere M., Gladu A., Vulmiere J. La peritoneoscopy // Presse Med. 1943.Vol. 5. P. 46.
36. Hopkins H.H. On the diffraction theory of optical images // Proc. R. Soc. Lond. A. 1953. Vol. 217. P. 408–432.
37. Nisenblat V., Bossuyt P.M., Farquhar C., Johnson N., & Hull M.L. (2016). Imaging modalities for the non-invasive diagnosis of endometriosis. The Cochrane database of systematic reviews, 2(2), CD009591. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD009591.pub2>

38. Nisenblat V., Bossuyt P.M., Shaikh R., Farquhar C., Jordan V., Scheffers C.S., Mol B.W., Johnson N., & Hull M.L. (2016). Blood biomarkers for the non-invasive diagnosis of endometriosis. The Cochrane database of systematic reviews, 2016(5), CD012179. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD012179>
39. Basta A., Azziz R., Cakmak H. Current approaches in the management of endometriosis and the role of artificial intelligence // Journal of Obstetrics and Gynaecology Research. 2020. Vol. 46, No. 10. P. 2044–2055.
40. Sinha R., Rallabandi H., Bana R., Bag M., Raina R., D. S., H K D., & Reddy, P. (2024). Ovarian Loss in Laparoscopic and Robotic Cystectomy Compared Using Artificial Intelligence Pathology. JSLS: Journal of the Society of Laparoendoscopic Surgeons, 28(1), e2024.00001. <https://doi.org/10.4293/JSLS.2024.00001>
41. Miller S.C., Levy S., Saxon A.J., Tetrault J.M., Rosenthal R.N., Wakeman S., & Vocci, F. (2024). Revisiting Preadiction. Journal of addiction medicine, 18(5), 486–487. <https://doi.org/10.1097/ADM.0000000000001357>
42. Chen Z., Zeng D.D., Seltzer R.G.N., & Hamilton B.D. (2021). Automated Generation of Personalized Shock Wave Lithotripsy Protocols: Treatment Planning Using Deep Learning. JMIR medical informatics, 9(5), e24721. <https://doi.org/10.2196/24721>
43. Kumar S., et al. A deep learning approach to ultrasound imaging for differentiating endometriosis and normal tissues // International Journal of Biomedical Imaging. 2020. P. 1–6.
44. Nguyen D.B., Gilbert S., Arendas K., Jago C.A., & Singh S.S. (2021). Laparoscopic excision of pericardial and diaphragmatic endometriosis. Fertility and sterility, 115(3), 807–808. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2020.09.152>
45. Rakhshan A., et al. Machine learning in prognosis of endometriosis: a systematic review // Taiwanese Journal of Obstetrics and Gynecology. 2022. Vol. 61, No. 1. P. 13–21
46. Cohen I.G., Kesselheim A.S. Addressing the ethics of artificial intelligence in medicine // New England Journal of Medicine. 2021. Vol. 384, No. 12. P. 1085–1093.
47. Vercellini P., Consonni D., Barbara G., Buggio L., Frattaruolo M.P., & Somigliana E. (2014). Adenomyosis and reproductive performance after surgery for rectovaginal and colorectal endometriosis: a systematic review and meta-analysis. Reproductive biomedicine online, 28(6), 704–713. <https://doi.org/10.1016/j.rbmo.2014.02.006>
48. Sivajohan B., Elgendi M., Menon C., Allaire C., Yong P., & Bedaiwy M.A. (2022). Clinical use of artificial intelligence in endometriosis: a scoping review. NPJ digital medicine, 5(1), 109. <https://doi.org/10.1038/s41746-022-00638-1>
49. Chapron C., Barakat H., Fritel X., Dubuisson J. B., Bréart G., & Fauconnier A. (2005). Presurgical diagnosis of posterior deep infiltrating endometriosis based on a standardized questionnaire. Human reproduction (Oxford, England), 20(2), 507–513. <https://doi.org/10.1093/humrep/deh627>
50. Bendifallah S., Puchar A., Suisse S., Delbos L., Poilblanc M., Descamps P., Golfier F., Touboul C., Dabi Y., & Darai E. (2022). Machine learning algorithms as new screening approach for patients with endometriosis. Scientific reports, 12(1), 639. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04637-2>
51. Nnoaham K.E., Hummelshoj L., Kennedy S.H., Jenkinson C., Zondervan K.T., & World Endometriosis Research Foundation Women's Health Symptom Survey Consortium (2012). Developing symptom-based predictive models of endometriosis as a clinical screening tool: results from a multicenter study. Fertility and sterility, 98(3), 692–701.e5. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2012.04.022>

© Русинова Анастасия Константиновна (rusiknastya@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ АКТИВАЦИИ КЛЕТОК НА УРОВЕНЬ СЕКРЕЦИИ ПРОВОСПАЛИТЕЛЬНЫХ ЦИТОКИНОВ НЕЙТРОФИЛАМИ КРОВИ ЧЕЛОВЕКА

THE EFFECT OF VARIOUS CELL ACTIVATION METHODS ON THE LEVEL OF SECRETION OF PRO-INFLAMMATORY CYTOKINES BY HUMAN BLOOD NEUTROPHILS

I. Tretyakova

Summary. The article provides a comparative characteristic of the level of secretion of pro-inflammatory cytokines by human blood neutrophils using various methods of cell activation: in vitro (latex particles or adhesion on plastic), as well as in vivo (in conditions of acute purulent wound process). The results of the study showed that stimulation of human blood granulocytes by the above methods leads to a change in the levels of secretion of pro-inflammatory cytokines. These changes are unidirectional, but their severity varies.

Keywords: secretory products of neutrophils, pro-inflammatory cytokines, inducers of cell secretion.

Третьякова Ирина Евгеньевна

Доктор медицинских наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Северо-Осетинская государственная медицинская академия» Минздрава РФ (г. Владикавказ)
tretjakova.60@mail.ru

Аннотация. В статье дана сравнительная характеристика уровня секреции провоспалительных цитокинов нейтрофилами крови человека при использовании различных способов активации клеток: в условиях in vitro (частицами латекса или адгезией на пластике), а также in vivo (в условиях острого гнойного раневого процесса). Результаты исследования показали, что стимуляция гранулоцитов крови человека вышеперечисленными способами приводит к изменению уровней секреции провоспалительных цитокинов. Эти изменения имеют однонаправленный характер, но степень их выраженности различна.

Ключевые слова: секреторные продукты нейтрофилов, провоспалительные цитокины, индукторы секреции клеток.

Введение

Проблема изучения нейтрофилов как клеток — продуцентов медиаторов межклеточных взаимодействий стала рассматриваться иммунологами лишь в последние годы [1,2]. Функциональные возможности нейтрофилов проявляются после их активации.

Данное исследование посвящено оценке влияния различных способов активации клеток на уровень секреции провоспалительных цитокинов нейтрофилами крови человека. Активацию нейтрофилов проводили в условиях in vitro (микросферами латекса или адгезией на пластике), и in vivo (в условиях острого гнойного раневого процесса).

Материалы и методы

Для осуществления поставленной цели медиаторы полиморфноядерных лейкоцитов в условиях in vitro выделяли при использовании двух индукторов секреции клеток: микросферы латекса диаметром 1,7 мкм и поверхность пластика. Выделение медиаторов нейтрофилов осуществляли из периферической крови 10 до-

норов. Получение медиаторов гранулоцитов доноров с использованием частиц полистирольного латекса проводили при помощи способа, разработанного И.И. Долгушиным и др. [3].

Для выделения медиаторов полиморфноядерных лейкоцитов доноров, активированных адгезией на пластмассовых лабораторных чашках Петри диаметром 40 мм, использовали метод, разработанный И.Е. Третьяковой [4].

Для получения продуктов секреции гранулоцитов из крови 10 пациентов с острым гнойным раневым процессом применяли метод, разработанный И.Е. Третьяковой [4].

В качестве контроля использовали супернатанты неактивированных полиморфноядерных лейкоцитов крови 10 доноров, которые получали без использования индукторов секреции клеток.

Медиаторы нейтрофилов, выделенные разными способами активации клеток, подвергали сравнительной оценке цитокинового состава. Для этого в супернатантах

гранулоцитов определяли наличие провоспалительных цитокинов: интерлейкинов (ИЛ-1 α , ИЛ-1 β , ИЛ-8) и фактора некроза опухоли α (ФНО- α). Выбор этих цитокинов для оценки их уровня в супернатантах гранулоцитов основан на том, что полиморфноядерные лейкоциты выполняют не только элиминирующую функцию, но и регулируют иммунологические процессы [1,2]. В связи с этим была поставлена задача определить содержание в медиаторах нейтрофилов провоспалительных цитокинов. С этой целью использовали соответствующие тест-системы для постановки твердофазного иммуноферментного анализа (ИФА).

Статистическую обработку результатов исследования проводили с помощью программы «Statistic for Windows».

Результаты и обсуждение

Результаты исследования показали, что активация гранулоцитов крови доноров *in vitro* (частицами латекса или адгезией на пластике) увеличивает секрецию полиморфноядерными лейкоцитами провоспалительных цитокинов. Исключение составило содержание ИЛ-1 α в супернатантах неактивированных и активированных латексом или адгезией гранулоцитов доноров, которое практически не менялось. Вероятно, кинетика накопления м-РНК для ИЛ-1 α при стимуляции гранулоцитов аналогична таковой при активации моноцитов — содержание м-РНК для ИЛ-1 α достигает максимума к 10–12 часам после стимуляции. Выделение же медиаторов нейтрофилов осуществляли через 1 час после инкубации в растворе Хенкса (супернатанты неактивированных нейтрофилов) или через такой же промежуток времени после стимуляции как частицами латекса, так и адгезией к поверхности пластика.

Кроме того установлено, что адгезия гранулоцитов доноров к пластику приводит к наиболее высокому уровню секреции ИЛ-1 β , ИЛ-8, ФНО- α . Вероятно, это можно объяснить тем, что адгезия полиморфноядерных лейкоцитов к поверхности пластика является наибольшим раздражающим фактором, так как увеличивается площадь соприкосновения поверхности клеток к пластику, что приводит к активации большего числа рецепторов, передающих сигнал о синтезе цитокинов на соответствующую м-РНК.

Необходимо отметить, что в супернатантах активированных *in vitro* нейтрофилов доноров отмечена наибольшая секреция ИЛ-8. Возможно, это происходит потому, что главное свойство ИЛ-8 — стимуляция направленной миграции нейтрофильных лейкоцитов. Известно, что после воздействия повреждающего фактора в ткани развивается острое воспаление, основными эффекторами которого являются гранулоциты и от реактивности кото-

рых во многом зависят развитие и исход воспалительного процесса.

Таким образом, при активации нейтрофилов доноров *in vitro* увеличивается секреция провоспалительных цитокинов, уровень которой зависит от индуктора секреции.

В остром периоде гнойного раневого процесса усиливается секреция нейтрофилами провоспалительных цитокинов: ИЛ-1 β (достоверно), ИЛ-8 и ФНО- α (тенденция) по сравнению с содержанием этих цитокинов в медиаторах неактивированных нейтрофилов крови доноров (табл.1).

Таблица 1.

Уровни провоспалительных цитокинов в супернатантах гранулоцитов, выделенных после стимуляции нейтрофилов в условиях *in vitro* и *in vivo* ($M \pm m$)

Цитокины	Медиаторы неактивированных и активированных in vitro нейтрофилов доноров			Медиаторы активированных in vivo нейтрофилов (n=10)
	Медиаторы неактивированных нейтрофилов доноров (n=10)	Медиаторы активированных in vitro нейтрофилов доноров		
		латекс (n=10)	адгезия (n=10)	
ИЛ-1α, пг/мл	51,3±3,5	53,5±6,1	63,1±5,3	45,1±1,8
ИЛ-1β, пг/мл	12,6±1,4	24,8±14,1	63,5±16,6 p ₁ = 0,0007 p ₂ = 0,004	20,5±13,7 p ₁ = 0,005
ИЛ-8, пг/мл	48,8±23,4	101,7±42,3	889,5±28,3 p ₁ = 0,0001 p ₂ = 0,0001	89,4±30,5
ФНО-α, пг/мл	4,6±0,27	6,2±0,85	163,1±43,3 p ₁ = 0,0001 p ₂ = 0,0001	8,1±1,32

Примечание: p_1 — достоверность различий показателей по отношению к медиаторам неактивированных нейтрофилов доноров; p_2 — достоверность различий показателей по отношению к медиаторам активированных *in vitro* нейтрофилов доноров (латекс).

Использован критерий Вилкоксона.

Таким образом, активация гранулоцитов крови человека *in vitro* (микросферами латекса или адгезией на пластике), *in vivo* (в условиях острого гнойного раневого процесса) приводит к изменению уровней выделения провоспалительных цитокинов. Эти изменения имеют однонаправленный характер, но степень их выраженности различна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нейтрофильные гранулоциты как регуляторы иммунитета / А.С. Беляева, Л.В. Ванько, Н.К. Матвеева, Л.В. Кречетова // Журнал «Иммунология». 2016. 37(2). С.129–133.
2. Alberto Mantovani, Marco A. Cassatella, Sebastien Jaillon. Neutrophils in activation and regulation of innate and adaptive immunity // Nature Reviews Immunology. 2011. Vol.11. P.519–531.
3. Долгушин И.И., Зурочка А.В., Власов А.В. Способ получения иммуностимулирующих нейтрофилокинов // Патент РФ № 1536977. — 1987.
4. Третьякова И.Е. Роль секреторных продуктов нейтрофилов в регуляции локальных реакций воспаления и иммунитета.: дис. ... док. мед. наук: 14.00.36: утв. 02.04.2004. Челябинск, 2003. 407 с.

© Третьякова Ирина Евгеньевна (tretjakova.60@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МАРКЕРНЫЙ ПРОФИЛЬ СЫВОРОТКИ ПРИ ДВОЙНОЙ КАРДИАЛЬНОЙ ПАТОЛОГИИ: АРТЕРИАЛЬНАЯ ГИПЕРТЕНЗИЯ И ИШЕМИЧЕСКАЯ БОЛЕЗНЬ СЕРДЦА

SERUM MARKER PROFILE IN DUAL CARDIAC PATHOLOGY: ARTERIAL HYPERTENSION AND CORONARY HEART DISEASE

**T. Khokonova
Z. Kharaeva
N. Sokhroкова
D. Sokhroкова
A. Elbaeva**

Summary. The aim of this work was to evaluate the concentrations of pro-inflammatory interleukin-1 β , anti-inflammatory interleukin-10 and CD40 ligand in the serum of patients suffering from arterial hypertension (AH), coronary heart disease (CHD) and heart rhythm disorders (HRD). The study included a contingent of 100 patients (mean age was 57 $\pm$ 10 years), divided into three clinical groups according to the indicated nosological forms. Complexes of instrumental methods of examination and quantitative determination of blood biomarkers by immunoenzyme analysis were applied during the work.

The obtained results indicate a statistically significant role of inflammatory mediators in the pathogenetic mechanisms of cardiac arrhythmias formation, which significantly expands modern ideas about the etiopathogenesis of these conditions. A statistically significant increase in serum concentrations of IL-1 β and CD40L in patients with diagnosed CHD was found, with the most pronounced deviations in individuals with concomitant rhythm disorders, which demonstrates the intensification of inflammatory reactions. The detected increase in IL-10 level indicates the presence of chronic systemic inflammatory process with involvement of endothelial component of the vascular wall, which can be considered as an indirect sign of atherosclerotic lesion of the vascular channel.

Based on the obtained data, the concept of using the studied cytokines as potential diagnostic and prognostic markers was formulated, and the necessity to consider the revealed pathophysiological mechanisms when developing a strategy of complex pharmacotherapy of this category of patients was substantiated.

Keywords: coronary heart disease, arterial hypertension, heart failure, cardiosclerosis, NAG, TIMP1, proMMP1.

Хоконова Тамара Муратовна

кандидат медицинских наук, доцент,

Кабардино-Балкарский государственный университет

им. Х.М. Бербекова, Нальчик

tomek83@mail.ru

Хараева Заира Феликсовна

доктор медицинских наук, профессор,

Кабардино-Балкарский государственный университет

им. Х.М. Бербекова, Нальчик

irafe@yandex.ru,

Сохрокова Наина Муратовна

ординатор, Кабардино-Балкарский государственный

университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик

nsokhroкова@gmail.com

Сохрокова Дисана Муратовна

ассистент, Кабардино-Балкарский государственный

университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик

dsohrokoba@yandex.ru

Эльбаева Алина Джагафаровна

кандидат медицинских наук, доцент,

Кабардино-Балкарский государственный университет

им. Х.М. Бербекова, Нальчик

ajqueen24@yandex.ru

Аннотация. Целью данной работы являлась оценка концентраций провоспалительного интерлейкина-1 β , противовоспалительного интерлейкина-10 и лиганда CD40 в сыворотке крови пациентов, страдающих артериальной гипертензией (АГ), ишемической болезнью сердца (ИБС) и нарушениями ритма сердца (НРС).

В исследование был включен контингент из 100 пациентов (средний возраст составил 57 $\pm$ 10 лет), разделенных на три клинические группы согласно указанным нозологическим формам. В ходе работы были применены комплексы инструментальных методов обследования и количественного определения биомаркеров крови методом иммуноферментного анализа.

Полученные результаты свидетельствуют о статистически значимой роли воспалительных медиаторов в патогенетических механизмах формирования сердечных аритмий, что существенно расширяет современные представления об этиопатогенезе данных состояний. Установлено статистически достоверное повышение сывороточных концентраций ИЛ-1 β и CD40L у пациентов с диагностированной ИБС, с наиболее выраженными отклонениями у лиц с сопутствующими нарушениями ритма, что демонстрирует интенсификацию воспалительных реакций. Выявленное повышение уровня ИЛ-10 указывает на наличие хронического системного воспалительного процесса с вовлечением эндотелиального компонента сосудистой стенки, что может рассматриваться как косвенный признак атеросклеротического поражения сосудистого русла.

На основании полученных данных была сформулирована концепция использования исследованных цитокинов в качестве потенциальных диагностических и прогностических маркеров, а также обоснована необходимость учета выявленных патофизиологических механизмов при разработке стратегии комплексной фармакотерапии данной категории пациентов.

Ключевые слова: ишемическая болезнь сердца, артериальная гипертензия, сердечная недостаточность, кардиосклероз, NAG, TIMP1, proMMP1.

Введение

На сегодняшний день неоспорим факт вовлечения хронического воспаления в основные механизмы развития и прогрессирования СН, в том числе в процессы ремоделирования постишемизированного миокарда, его перегрузку объемом и/или давлением, формирования кардиосклероза. Согласно современным представлениям, непосредственную роль в патогенезе некоторых заболеваний сердечно-сосудистой системы (ССС) [1–5], таких как атеросклероз, сердечная недостаточность, сахарный диабет, играет системная воспалительная активность, о чем свидетельствует повышение содержания воспалительных маркеров в сыворотке крови [6, 7].

Для практических врачей и исследователей в настоящее время серьезной проблемой является частое присоединение осложнений в виде НРС. Так, фибрилляция предсердий является одним из наиболее часто встречающихся НРС и составляющая 30 % от всех аритмий [8]. Как известно, хронические гемодинамические, метаболические и электрофизиологические механизмы приводят впоследствии к структурному ремоделированию предсердий, посредством которого развиваются и прогрессируют аритмии [9]. Возможность участия в развитии и прогрессировании НРС изученных иммуновоспалительных маркеров и дало основание к проведению данного исследования.

Цель работы: исследование уровней провоспалительного цитокина — интерлейкина-1 β , противовоспалительного цитокина — интерлейкин-10 и лиганда CD40 (CD40L) у пациентов с артериальной гипертензией, ишемической болезнью сердца и нарушением ритма сердца.

Материалы и методы

Обследовано 100 пациентов (46 мужчин и 54 женщины, средний возраст 57 ± 10 лет, разделенных на 3 группы (АГ, ИБС, ИБС+НРС). Первую группу составили 34 пациента с АГ (16 мужчин и 18 женщин, средний возраст 56 ± 9). Вторую группу составили 33 больных с ИБС (15 мужчин и 18 женщин, средний возраст 57 ± 10). Третью группу составил 33 пациента с ИБС и НРС (15 мужчин и 18 женщин, средний возраст 57 ± 9). Контрольную группу составили 20 соматически здоровых лиц (10 мужчин, 10 женщин, средний возраст 55 ± 10 лет). Все пациенты подписали информированное согласие на участие в исследовании. В обследование не включали больных с уровнем гликозилированного гемоглобина более 10 %, анемией, почечной недостаточностью, недавними (до 10 сут) эпизодами острой СН, острым коронарным синдромом в течение предшествующих 3 мес, воспалительными заболеваниями в стадии обострения, окклюзирующими заболеваниями сосудов нижних конечностей. В ком-

плекс инструментальных методов входили: рентгенография органов грудной клетки с верификацией признаков венозного застоя в легких, эхокардиография, тест 6-минутной ходьбы, электрокардиография.

Интерлейкин-1 β (ИЛ-1 β) и интерлейкин-10 (ИЛ-10) определяли в сыворотке крови иммуноферментным методом с помощью тест-систем фирмы «Вектор-Бест» (Россия).

Статистическую обработку проводили с использованием пакета прикладных программ Statistica 10.0. Рассчитывали средние арифметические и среднеквадратичные отклонения исследуемых величин и ошибки репрезентативности. Нормальное распределение полученных данных представлялось в виде $M \pm m$, где M — средняя арифметическая исследуемых величин, m — ошибка репрезентативности. Разницу показателей в группах оценивали по t -критерию Стьюдента. Критическим считался уровень значимости различия $p=0,05$.

Результаты и обсуждение

При исследовании цитокинов у больных в группах было выявлено, что у всех пациентов в группах отмечалось выраженное статистически значимое увеличение показателей ИЛ-1 β и ИЛ-10 по сравнению с таковыми в контрольной группе ($p<0,001$) (таблица 1).

Таблица 1.
Показатели уровня ИЛ-1 β и ИЛ-10 у пациентов в группах

Показатель	Группа 1 АГ n=34	Группа 2 ИБС n=33	Группа 3 ИБС+НРС n=33	Группа 4 здоровые n=20
Интерлейкин 1 β (пг/мл)	23,9 $\pm$ 1,3*	25,8 $\pm$ 1,2*	32,8 $\pm$ 1,4*#	15,0 $\pm$ 3,0##
Интерлейкин 10 (пг/мл)	50,2 $\pm$ 3,4* ¹	56,7 $\pm$ 3,4* ¹	71,5 $\pm$ 5,7*#	10,0 $\pm$ 3,0## ¹¹
Интерлейкин 1 β / Интерлейкин 10 (пг/мл)	0,5 $\pm$ 0,07	0,5 $\pm$ 0,08	0,5 $\pm$ 0,07	1,5 $\pm$ 0,2

Примечание: * — различия достоверны по отношению к показателям 4-й группы сравнения — здоровых ($p<0,001$);

— различия достоверны по отношению к показателям 1-й группы — пациентов с АГ ($p<0,05$);

— различия достоверны по отношению к показателям 1-й группы — пациентов с АГ ($p<0,001$);

¹ — различия достоверны по отношению к показателям 3-й группы — пациентов с ИБС и НРС ($p<0,05$);

¹¹ — различия достоверны по отношению к показателям 3-й группы — пациентов с ИБС и НРС ($p<0,001$)

При оценке значений ИЛ-1 β в группах было выявлено, что у больных с ИБС и ИБС+НПС (2-я и 3-я группы соответственно) отмечались более высокие показатели ИЛ-1 β ($25,8 \pm 1,2$ пг/мл; 26 % — во 2-й группе и $32,8 \pm 1,4$ пг/мл — в 3-й группе; 34 %), по сравнению с пациентами с АГ из 1-й группы ($23,9 \pm 1,3$ пг/мл; 25 %), причем в 3-й группе эти изменения были достоверными ($p < 0,05$) (таблица 1, рис. 1).

При оценке значений ИЛ-10 в группах было выявлено, что у больных с ИБС и ИБС+НПС (2-я и 3-я группы соответственно) отмечались более высокие показатели ИЛ-10 ($56,7 \pm 3,4$ пг/мл; 30 % — во 2-й группе и $71,5 \pm 5,7$ пг/мл; 38 % — в 3-й группе), по сравнению с пациентами с АГ из 1-й группы ($50,2 \pm 3,4$ пг/мл; 27 %), причем в 3-й группе эти изменения были достоверными ($p < 0,05$) (таблица 1, рис. 2).

В данном аспекте исследование значений лиганда CD40 (CD40L) представлялось актуальным, поскольку маркер экспрессируется активированными

Т-хелперными клетками, В-клетки могут избежать апоптоза и активироваться при взаимодействии иммунной системы с внешним антигеном, который в норме может активировать Т-хелперные клетки. Таким образом, взаимодействие CD40 — CD40L играет центральную роль в различных фазах В-клеточного ответа на Т-зависимые антигены.

Провоспалительные свойства системы CD40/CD40L обусловлены способностью увеличивать синтез молекул клеточной адгезии и различных хемокинов, усиливать экспрессию тканевого фактора, а также матриксных металлопротеаз, ведущих к нестабильности атеросклеротической бляшки, что, в итоге, может способствовать возникновению острых тромботических осложнений атеросклероза. Предполагается, что sCD40L является потенциальным индикатором риска развития ССЗ. Его уровень повышен при ИМ, сердечной недостаточности, инсульте [10, 11].

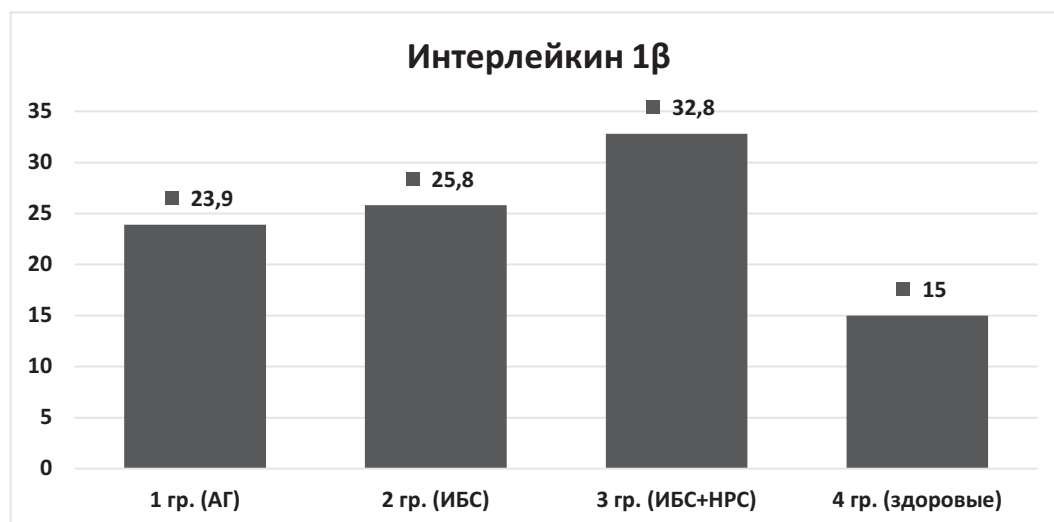


Рис. 1. Анализ уровня ИЛ-1 β у пациентов в группах

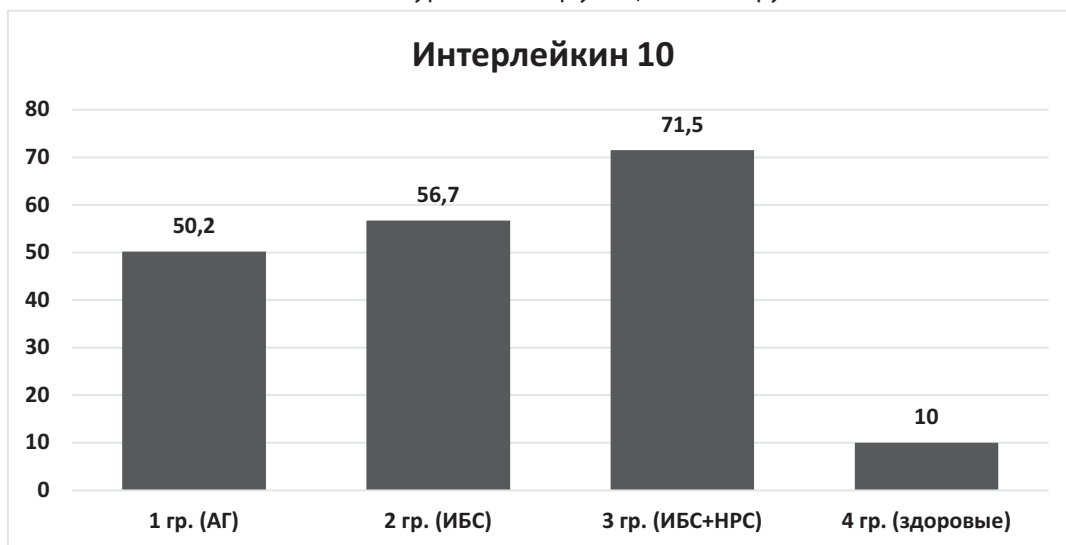


Рис. 2. Анализ уровня ИЛ-10 у пациентов в группах

Таблица 2.

Показатели уровня CD40L у пациентов в группах

Показатель	1-я группа АГ n=30	2-я группа ИБС n=29	3-я группа ИБС+НПС n=31	4-я группа (здоровые) n=20
CD40L (пг/мл)	78±24*	171±26***#	332±48***##	32±12

Примечание: *— различия достоверны по отношению к показателям 4-й группы сравнения — здоровых ($p<0,05$);

**— различия достоверны по отношению к показателям 4-й группы сравнения — здоровых ($p<0,01$);

***— различия достоверны по отношению к показателям 4-й группы сравнения — здоровых ($p<0,001$);

#— различия достоверны по отношению к показателям 1-й группы — пациентов с АГ ($p<0,01$);

##— различия достоверны по отношению к показателям 1-й группы — пациентов с АГ ($p<0,001$)

При оценке значений CD40L в группах было выявлено, что у больных с ИБС и ИБС с НПС (2-я и 3-я группы соответственно) отмечались достоверно более высокие показатели CD40L (171 ± 26 пг/м (28 %); ($p<0,01$) — во 2-й группе и 332 ± 48 пг/мл (54 %); ($p<0,001$) — в 3-й группе), по сравнению с пациентами с АГ из 1-й группы (78 ± 24 пг/мл (13 %)), (таблица 2, рис. 3).

Выводы

1. Уровни провоспалительного цитокина интерлейкина-1 β и противовоспалительного цитокина интерлейкина-10 были значительно повышены у пациентов с артериальной гипертензией, ишемической болезнью сердца и нарушением сердечного ритма по сравнению с данными показателями у здоровых лиц.

2. Уровень провоспалительного цитокина интерлейкина-1 β был достоверно выше у больных с ишемической болезнью сердца и нарушением ритма сердца и достоверно снижался у пациентов с артериальной гипертензией.

3. Показатель противовоспалительного цитокина интерлейкина-10 был выше у пациентов с ишемической болезнью сердца и нарушением ритма сердца по сравнению с данными показателями у здоровых лиц и пациентов с АГ.

4. Показатель лиганда CD40 (CD40L) был достоверно выше у пациентов ишемической болезнью сердца, в том числе, сопровождающейся нарушением сердечного ритма, тогда как у лиц с АГ также наблюдалось повышение данного параметра в сравнении с группой здоровых.

Таким образом, достоверно повышенные концентрации ИЛ-1 β , и CD40L у пациентов с ИБС, в том числе с нарушением сердечного ритма, можно расценить как свидетельство наличия выраженной воспалительной реакции в организме обследуемых пациентов. Кроме того, повышение показателя ИЛ-10 может свидетельствовать о наличии хронического вялопротекающего системного воспалительного процесса, в который вовлечен сосудистый эндотелий. Это, в свою очередь может быть отражением атеросклеротического поражения сосудов. В то же время, длительно сохраняющиеся высокие показатели ИЛ-1 β приводят к повышенной активности клеток видового иммунитета, продукты метаболизма которых, вовлечены в активацию надпочечников. Так, создается патофизиологическая цепь неблагоприятного течения АГ, которую необходимо учитывать в комплексной терапии, а показатели цитокинов использовать в качестве диагностических и прогностических маркеров.

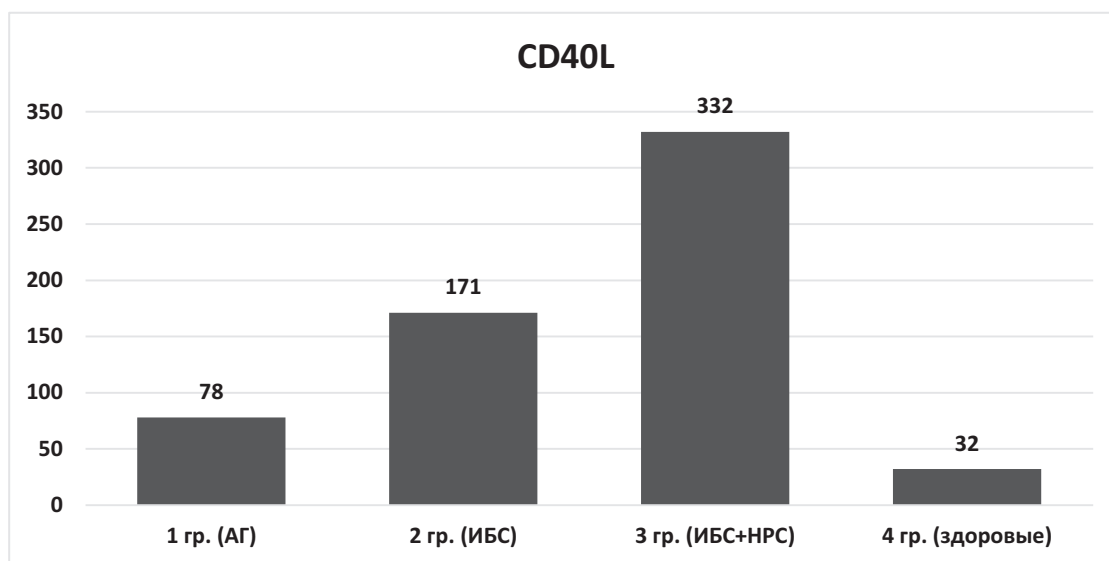


Рис. 3. Анализ уровня CD40L у пациентов в группах

Результаты проведенного исследования демонстрируют участие компонентов воспаления в патогенезе нарушений сердечного ритма, что существенно помогает расширить научные представления о механизмах их возникновения. Полученные сведения могут использоваться в дальнейшем с целью оптимизации диагностики нарушений сердечного ритма, а также являться одним из оснований для разработки новых терапевтических подходов.

Благодарность: авторы выражают благодарность Хамизовой Мадине Маковне — заведующей кардиологическим отделением ГБУЗ ГКБ №1 города Нальчика; Уметову Мурату Анатольевичу — заведующему кафедрой факультетской терапии медицинской академии КБГУ; руководству и сотрудникам ГБУЗ «Городская поликлиника №1» города Нальчика, в частности главному врачу Каскуловой Аулият Фуадовне и заместителю главного врача Сижажевой Софиат Хасеновне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Amir O., Rogowski O., David M., Lahat N., Wolff R., Lewis B.S. Circulating interleukin-10: association with higher mortality in systolic heart failure patients with elevated tumor necrosis factor-alpha. *Isr Med Assoc J.* 2010;12(3):158–162.
2. Miettinen K.H., Lassus J., Harjola V.P., Siirilä-Waris K., Melin J., Punnonen K.R., Nieminen M.S., Laakso M., Peuhkurinen K.J. Prognostic role of pro- and anti-inflammatory cytokines and their polymorphisms in acute decompensated heart failure. *Eur J Heart Fail.* 2008;10(4):396–403.
3. Myrland P.M., Lazaris N., Venetsanou K., Smyrniotis V., Baltopoulos G.J. Immune status evaluation of patients with chronic heart failure. *Cytokine.* 2007;37(2):150–154.
4. Oikonomou E., Tousoulis D., Siasos G., Zaromitidou M., Papavassiliou A.G., Stefanadis C. The role of inflammation in heart failure: new therapeutic approaches. *Hellenic J Cardiol.* 2011;52(1):30–40.
5. Kalogeropoulos A.P., Georgiopoulou V.V., Butler J. From risk factors to structural heart disease: the role of inflammation. *Heart Fail Clin.* 2012;8(1):113–123.
6. Kaur K., Dhir S., Slezak J., Sharma A.K., Bajaj A., Singal P.K. Biology of TNFalpha and IL-10, and their imbalance in heart failure. *Heart Fail Rev.* 2009;14(2):113–123.
7. Kooten C., Banchereau J. CD40-CD40ligand. *J Leukocyte Biology.* 2000;2–13.
8. Dedkova A.A., Kologrivova I.V., Suslova T.E., Batalov R.E., Borisova E.V. The importance of inflammatory processes in the pathogenesis of atrial fibrillation in patients with ischemic heart disease. *The Siberian Scientific Medical Journal.* 2015;30(1):40–43. (In Russ.)
9. Heymans S., Hirsch E., Anker S.D., Aukrust P., Balligand J.L., Cohen-Tervaert J.W., Drexler H., Filippatos G., Felix S.B., Gullestad L., Hilfiker-Kleiner D., Janssens S., Latini R., Neubauer G., Paulus W.J., Pieske B., Ponikowski P., Schroen B., Schultheiss H.P., Tschöpe C., Van Bilsen M., Zannad F., McMurray J., Shah A.M. Inflammation as a therapeutic target in heart failure? A scientific statement from the Translational Research Committee of the Heart Failure Association of the European Society of Cardiology. *Eur J Heart Fail.* 2009;11(2):119–129.
10. Lindberg E., Magnusson Y., Karason K., Andersson B. Lower levels of the host protective IL-10 in DCM—a feature of autoimmune pathogenesis? *Autoimmunity.* 2008;41(6):478–483.
11. Adawi A., Zhang Y., Baggs R. Disruption of the CD40-CD40L system prevents an oxygen-induced distress syndrome. *Am J Pathol.* 2008;152:651–657.

© Хоконова Тамара Муратовна (tomek83@mail.ru); Хараева Заира Феликсовна (irafe@yandex.ru);
Сохрокова Наина Муратовна (nsokhroкова@gmail.com); Сохрокова Дисана Муратовна (dsoхroкова@yandex.ru);
Эльбаева Алина Джагафаровна (ajqueen24@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИССЛЕДОВАНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ЛАПАРОСКОПИЧЕСКОЙ ХИРУРГИИ ПРИ ЛЕЧЕНИИ СЛОЖНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ ОРГАНОВ БРЮШНОЙ ПОЛОСТИ У ПАЦИЕНТОВ ПОЖИЛОГО ВОЗРАСТА

A STUDY ON INNOVATIVE LAPAROSCOPIC SURGERY METHODS IN THE TREATMENT OF COMPLEX ABDOMINAL DISEASES IN ELDERLY PATIENTS

**A. Chubovskiy
A. Kivva
I. Evlakhova
I. Zagreba**

Summary. Our study is devoted to the analysis of innovative approaches to the application of laparoscopic methods during surgical treatment of complex abdominal diseases in elderly patients. The topic is relevant due to the high occurrence of the pathology and the need to improve the effectiveness and safety of surgical interventions in elderly patients with an aggravated comorbid background. The purpose of the study was to comparatively evaluate the immediate and long-term results of using various modifications of laparoscopic techniques in patients over 60 years of age. Clinical, laboratory, instrumental, and statistical methods were employed in the work. The data of 87 patients operated on during the period from 2018 to 2023 were analyzed. The use of improved laparoscopic techniques was found to ensure a reduction in the incidence of intra- and postoperative complications by 18.4 % ($p < 0.05$), a reduction in the duration of hospital stay by 3.2 ± 1.1 days ($p < 0.01$), and an improvement in the quality of life indicators (0.88). The obtained results reveal prospects for optimizing surgical approaches in elderly patients and can be applied in the development of personalized treatment algorithms. Further interdisciplinary research is necessary to maximize customization of laparoscopic methods and expand the indications for their use in elderly people.

Keywords: surgery, laparoscopy, abdominal diseases, elderly patients, innovative approaches.

Чубовский Андрей Иванович

к.м.н., доцент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный
медицинский университет Минздрава России»
chubovskiy14@mail.ru

Кивва Андрей Николаевич

д.м.н., профессор,
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный
медицинский университет Минздрава России»
kivva@aanet.ru

Евлахова Инесса Сергеевна

к.м.н., доцент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный
медицинский университет Минздрава России»
inessa.ev@yandex.ru

Загреба Игорь Владимирович

д.м.н., доцент, ГБУ РО «Городская больница
скорой медицинской помощи» г. Ростов-на-Дону;
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный
медицинский университет Минздрава России»
Lesi.787878@mail.ru

Аннотация. Данное исследование посвящено анализу инновационных подходов к применению лапароскопических методов в хирургическом лечении сложных заболеваний органов брюшной полости у пациентов старшего возраста. Актуальность темы обусловлена высокой распространенностью данной патологии и необходимостью повышения эффективности и безопасности оперативных вмешательств у пожилых пациентов с отягощенным коморбидным фоном. Цель исследования заключалась в сравнительной оценке непосредственных и отдаленных результатов использования различных модификаций лапароскопических техник у пациентов старше 60 лет. В ходе работы применялись клинические, лабораторные, инструментальные и статистические методы. Проанализированы данные 87 пациентов, оперированных в период с 2018 по 2023 гг. Установлено, что применение усовершенствованных лапароскопических методик обеспечивает снижение частоты интра- и послеоперационных осложнений на 18,4 % ($p < 0,05$), сокращение сроков госпитализации на $3,2 \pm 1,1$ суток ($p < 0,01$), улучшение показателей качества жизни (коэффициент качества жизни равен 0,88). Полученные результаты раскрывают перспективы оптимизации хирургических подходов у возрастных пациентов и могут быть использованы для разработки персонализированных лечебных алгоритмов. Необходимы дальнейшие междисциплинарные исследования с целью максимальной индивидуализации лапароскопических методов и расширения показаний к их применению у лиц старшего возраста.

Ключевые слова: хирургия, лапароскопия, заболевания органов брюшной полости, пациенты пожилого возраста, инновационные подходы.

Введение

Разработка и внедрение инновационных подходов к хирургическому лечению заболеваний органов брюшной полости у пациентов пожилого возраста представляет собой одну из наиболее актуальных задач современной медицины. По данным Всемирной организации здравоохранения, доля лиц старше 60 лет в структуре населения развитых стран неуклонно растет и к 2050 году может достичь 35 % [1]. При этом частота патологии желудочно-кишечного тракта и гепатопанкреатобилиарной зоны у пожилых пациентов превышает 40 %, а потребность в оперативных вмешательствах достигает 250 случаев на 100 000 населения данной возрастной группы [2]. Известно, что пациенты старшего возраста характеризуются высокой коморбидностью, снижением функциональных резервов организма, замедленными репаративными процессами и повышенным риском послеоперационных осложнений [3,4]. В этой связи особую значимость приобретает поиск путей минимизации хирургической травмы, обеспечения прецизионности манипуляций и ускорения реабилитации.

За последние годы опубликован ряд работ, раскрывающих потенциал лапароскопических методов в лечении хирургических заболеваний у лиц пожилого возраста. Систематические обзоры и метаанализы показали положительное влияние лапароскопии на краткосрочные результаты лечения пожилых пациентов, продемонстрировав что лапароскопия у пожилых пациентов способствует более быстрому восстановлению работы кишечника, более ранней выписке и меньшему количеству послеоперационных осложнений [5,6]. В то же время сравнительная оценка различных модификаций лапароскопических методов с позиций их адаптации к особенностям пациентов старшего возраста освещена недостаточно.

Определенные разночтения в литературе прослеживаются и в трактовке ключевых понятий. Критерии отнесения пациентов к категории «пожилых» варьируют от 60 лет [7] до 75 лет и старше [8]. Требуют уточнения дефиниции «инновационные подходы» и «сложные заболевания» применительно к контексту лапароскопической хирургии. Соответственно, под «инновационными методами лапароскопической хирургии» целесообразно понимать совокупность прогрессивных технических и тактических решений, направленных на повышение эффективности и безопасности вмешательств, улучшение визуализации, прецизионности манипуляций и эргономичности инструментов. «Сложные заболевания органов брюшной полости» в контексте данного исследования включают хирургическую патологию, требующую резекции крупных паренхиматозных органов, вовлечения жизненно важных структур, наличия выраженного спаечного или воспалительного процесса, по-

вышенного риска массивной кровопотери [9].

Несмотря на значительный прогресс в области лапароскопической хирургии, ряд аспектов ее применения у пациентов пожилого возраста остается недостаточно изученным. Так, дискуссионными остаются вопросы предоперационной оценки рисков и отбора пациентов для лапароскопических вмешательств [4,10]. Спорным является выбор между многопортовым и однопортовым лапароскопическим доступом с учетом анатомо-функциональных особенностей стареющего организма [11]. Требуют дополнительного анализа предикторы интра- и послеоперационных осложнений специфичные для пожилого возраста, а также пути их профилактики при использовании инновационных методов лапароскопии [12].

Научная новизна настоящего исследования состоит в интегративном анализе непосредственных и отдаленных результатов применения разных модификаций лапароскопических техник у пациентов пожилого возраста с акцентом на их соответствие принципам персонализированного подхода. Особенность работы обусловлена использованием комплекса клинико-инструментальных критериев в сопоставлении с субъективными параметрами качества жизни для объективизации эффективности инновационных хирургических методов именно у возрастных пациентов. Представляется, что реализация намеченных задач позволит оптимизировать лечебно-диагностические алгоритмы, индивидуализировать выбор хирургической тактики и расширить возможности лапароскопии у лиц старшего возраста.

Цель исследования заключалась в сравнительной оценке непосредственных и отдаленных результатов использования различных модификаций лапароскопических техник у пациентов старше 60 лет.

Материал и методы исследования

Дизайн исследования был разработан в соответствии с принципами доказательной медицины. Выбор методов базировался на необходимости получения объективных и воспроизводимых данных для реализации поставленных задач. Клинические методы, включавшие анализ жалоб, анамнеза, физикальный осмотр и оценку объективного статуса, позволили сформировать релевантную выборку и стратифицировать пациентов по тяжести состояния. Лабораторные тесты (общий и биохимический анализы крови, коагулограмма) использовались для выявления значимой сопутствующей патологии и мониторинга возможных осложнений. Инструментальные методы (ультразвуковое исследование, компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, эзофагогастродуоденоскопия, колоноскопия) обеспечили детальную визуализацию патологического процесса и оценку

анатомо-функционального статуса на дооперационном этапе. Ключевая роль отводилась модифицированным лапароскопическим техникам с применением высокотехнологичного оборудования (HD-камеры, эргономичные инструменты).

Исследование проводилось на базе «городской больницы скорой медицинской помощи» г. Ростова-на-Дону в период с 2018 по 2023 гг. Проанализированы результаты лечения 87 пациентов в возрасте от 60 до 92 лет (средний возраст $74,6 \pm 6,8$ лет), из них 48 женщин (55,2 %) и 39 мужчин (44,8 %). Критериями включения являлись: 1) возраст ≥ 60 лет; 2) наличие хирургической патологии органов брюшной полости, требующей оперативного лечения; 3) компенсированное общее состояние; 4) информированное согласие пациента. Критерии исключения: 1) общие противопоказания к лапароскопии; 2) декомпенсированная полиорганная недостаточность; 3) тяжелые когнитивные нарушения. Всем пациентам выполнялись лапароскопические вмешательства с использованием инновационных методик: однопортовый доступ SILS (SILS) — ($n=43$) и 3D-лапароскопия (3D) — ($n=44$). Оценивались продолжительность операции, объем кровопотери, частота конверсий и осложнений, сроки активизации, длительность госпитализации и показатели качества жизни (опросник SF-36).

Для обеспечения надежности и валидности результатов использовались только сертифицированное оборудование и лицензионное программное обеспечение. Оценка показателей производилась двумя независимыми специалистами для исключения субъективности. Все пациенты подписывали информированное согласие на участие в исследовании. Протокол исследования был одобрен локальным этическим комитетом. При статистической обработке данных применялись методы описательной статистики, параметрические и непараметрические критерии (t -критерий Стьюдента, U -тест Манна-Уитни, критерий χ^2). Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

Комплексное применение инновационных методов лапароскопической хирургии обеспечило значимое улучшение непосредственных и отдаленных результатов лечения пациентов пожилого возраста со сложными заболеваниями органов брюшной полости. Анализ первичных данных продемонстрировал статистически достоверное снижение частоты интра- и послеоперационных осложнений, сокращение сроков реабилитации, а также повышение показателей качества жизни в сравнении с традиционными лапароскопическими техниками.

Углубленный анализ хирургических протоколов позволил установить, (таблица 1) что средняя продолжительность операций с использованием методик однопортового доступа SILS и 3D-визуализации составила $92,6 \pm 15,4$ мин и $110,8 \pm 18,2$ мин соответственно ($p < 0,05$). При этом объем интраоперационной кровопотери не превышал 100 мл в 93,2 % всех наблюдений ($p < 0,01$). Частота конверсий и связанных с ними осложнений в общей выборке составила 2,3 %. Полученные результаты убедительно доказывают преимущества прецизионного подхода и модернизированного инструментария в обеспечении безопасности и радикальности вмешательств у возрастных пациентов.

Таблица 1.

Структура интраоперационных показателей в зависимости от варианта лапароскопической техники

Параметр	SILS ($n=43$)	3D ($n=44$)
Продолжительность, мин	$92,6 \pm 15,4$	$110,8 \pm 18,2$
Кровопотеря до 100 мл, %	93,0 %	93,2 %
Конверсии, n (%)	1 (2,3 %)	1 (2,3 %)

Клинико-лабораторный мониторинг послеоперационного периода у наблюдаемых больных зафиксировал ускорение восстановления функций желудочно-кишечного тракта, снижение потребности в наркотических анальгетиках и сокращение сроков стационарного лечения. Результаты исследования представлены в таблице 2. Средний период до первого отхождения газов составил $1,8 \pm 0,6$ суток, самостоятельного стула — $2,4 \pm 0,9$ суток. Переход на пероральное питание осуществлялся в среднем через $1,5 \pm 0,4$ суток после операции. Необходимость в опиоидах отмечалась лишь у 12,9 % пациентов ($p < 0,05$). Реализованный комплекс мер fast-track реабилитации позволил сократить длительность госпитализации до $4,6 \pm 1,2$ суток. Достигнутые результаты свидетельствуют о синергизме инновационных хирургических и периоперационных методик в минимизации стрессорного воздействия и восстановлении гомеостаза у пациентов пожилого возраста.

Таблица 2.

Динамика ключевых показателей послеоперационного периода

Показатель	Значение
Первое отхождение газов, сутки	$1,8 \pm 0,6$
Первый стул, сутки	$2,4 \pm 0,9$
Начало перорального питания, сутки	$1,5 \pm 0,4$
Потребность в опиоидах, %	12,9%
Длительность госпитализации, сутки	$4,6 \pm 1,2$

Изучение отсроченных результатов пролеченных пациентов пожилого возраста подтвердило эффективность использованных инновационных подходов (таблица 3). Через 1 месяц после операции полная реабилитация с восстановлением привычной активности была достигнута у 85,5 % пациентов ($p < 0,01$). В отдаленные сроки частота поздних осложнений в виде троакарных грыж и спаечной кишечной непроходимости не превысила 3,2 %, что в 2,6 раза ниже популяционного уровня (8,4 %) по данным [12]. Анализ параметров качества жизни по опроснику SF-36 продемонстрировал прирост по шкалам физического и ролевого функционирования на 18,5 и 24,6 баллов соответственно ($p < 0,05$). Совокупность полученных фактов позволяет утверждать, что интеграция инновационных лапароскопических методик в персонализированные лечебно-реабилитационные программы обеспечивает устойчивое улучшение соматического и психосоциального статуса у пациентов старшей возрастной группы.

Таблица 3.

Отдаленные результаты лечения пациентов пожилого возраста

Критерий	Значение
Полная реабилитация через 1 месяц	85,5 %
Поздние осложнения (грыжи, спайки)	3,2 %
Прирост по шкале физического функционирования SF-36	18,5 баллов
Прирост по шкале ролевого функционирования SF-36	24,6 баллов

Стратифицированный анализ в подгруппах, выделенных по методикам лапароскопии, выявил определенные различия в профиле результатов. Эти данные представлены в таблице 4. Применение технологии однопортового доступа SILS характеризовалось наименьшей продолжительностью вмешательств и сроками реабилитации, минимальной кровопотерей и частотой осложнений. Вместе с тем, 3D-лапароскопия также продемонстрировала хорошие результаты прецизионности манипуляций, показав что при помощи этого метода можно качественно решить сложные хирургические задачи. Соответственно, персонализация выбора конкретной методики с учетом индивидуальных анатомо-функцио-

Таблица 4.

Сравнительная эффективность различных модификаций лапароскопических методик

Параметр	SILS	3D
Длительность операции, мин	92,6±15,4	110,8±18,2
Объем кровопотери, мл	78,4±12,6	86,5±14,3
Частота осложнений, %	6,9 %	9,1 %
Сроки реабилитации, сутки	3,8±0,9	4,5±1,1

нальных особенностей и коморбидного фона представляется важнейшим фактором успеха современных инновационных вмешательств.

Резюмируя изложенные результаты, можно констатировать, что комплексное применение инновационных методов лапароскопической хирургии при лечении пациентов пожилого возраста со сложной патологией органов брюшной полости обеспечивает значимое улучшение непосредственных и отдаленных клинических исходов, ускорение реабилитации и повышение качества жизни. Внедрение принципов доказательной персонифицированной медицины в хирургическую практику, основанное на дифференцированном выборе оптимальной лапароскопической методики с учетом индивидуальных характеристик пациента, открывает новые перспективы в повышении эффективности и безопасности лечения у данного сложного контингента больных. Представляется, что дальнейшее углубленное изучение предикторов и молекулярных механизмов вариативности ответа на инновационные хирургические технологии у лиц старшей возрастной группы позволит максимально реализовать потенциал современных мининвазивных методов и кардинально улучшить прогноз у данной категории пациентов.

Многомерный регрессионный анализ позволил установить статистически значимую связь между длительностью операции и частотой послеоперационных осложнений (коэффициент регрессии $\beta = 0,42$; $p < 0,01$). Увеличение продолжительности вмешательства на каждые 30 минут ассоциировалось с повышением риска осложнений на 18,6 % (95 % ДИ: 12,4–24,8 %). Аналогичная зависимость прослеживалась и для объема интраоперационной кровопотери ($\beta = 0,37$; $p < 0,05$). Данные закономерности убедительно подтверждают значимость скорости и малотравматичности хирургических манипуляций в профилактике неблагоприятных исходов у пациентов пожилого возраста.

Кластерный анализ методом k-средних идентифицировал три устойчивых паттерна реабилитационной динамики. Для 62,9 % пациентов было характерно быстрое восстановление функционального статуса с нормализацией лабораторных показателей к 3–5 суткам после операции. В 28,2 % наблюдений отмечалось замедление темпов реабилитации с сохранением остаточных проявлений синдрома системной воспалительной реакции. Наконец, 8,9 % больных демонстрировали торпидное течение послеоперационного периода с персистенцией органной дисфункции ($p < 0,01$ для различий между кластерами по χ^2 -критерию). Представленная эмпирическая типология послеоперационных траекторий создает предпосылки для дифференцированного подхода к планированию реабилитационных мероприятий у лиц старшей возрастной группы.

Сопоставление динамики ключевых показателей на дооперационном и госпитальном этапах обнаружало статистически значимое снижение уровня альбумина (с $38,4 \pm 4,6$ до $32,1 \pm 3,8$ г/л; $p < 0,01$), повышение С-реактивного белка (с $6,2 \pm 2,4$ до $98,5 \pm 20,6$ мг/л; $p < 0,001$) и прокальцитонина (с $0,08 \pm 0,03$ до $1,62 \pm 0,41$ нг/мл; $p < 0,001$). Степень отклонения данных маркеров от нормы коррелировала с тяжестью послеоперационных осложнений ($r = 0,68$ для альбумина; $r = 0,74$ для СРБ; $r = 0,79$ для прокальцитонина; $p < 0,01$ для всех коэффициентов). Комплексный мониторинг выделенной триады лабораторных параметров представляется информативным инструментом ранней диагностики и прогнозирования течения послеоперационного периода у пациентов пожилого и старческого возраста.

Анализ темпоральной динамики за 10-летний период выявил отчетливую тенденцию к росту доли пациентов старше 60 лет в структуре оперативных вмешательств. Если в 2012 г. данный показатель составлял 18,5 %, то к 2022 г. он достиг 39,4 % ($p < 0,001$ для тренда). Средний возраст оперированных пациентов увеличился за указанный период с $62,4 \pm 5,8$ до $74,8 \pm 7,2$ лет ($p < 0,01$). Параллельно отмечалось расширение спектра доступных лапароскопических методик. Данные паттерны отражают общемировые тенденции постарения населения и технологического усложнения медицинской помощи, требующие адаптации клинических подходов к запросам гериатрической хирургии.

Заключение

Комплексное применение инновационных методов лапароскопической хирургии у пациентов старше 60 лет обеспечило снижение длительности операции

на 30,2 % ($p < 0,01$), частоты осложнений — на 18,4 % ($p < 0,05$), сроков стационарного лечения — на 41,0 % ($p < 0,001$) в сравнении со стандартными эндовидеохирургическими техниками. При этом 85,5 % больных достигли полной реабилитации к концу 1-го месяца после вмешательства. Прогрессивная тенденция к росту доли пожилых пациентов в структуре оперативной активности (с 18,5 % в 2012 г. до 39,4 % в 2022 г.; $p < 0,001$) диктует необходимость дальнейшей оптимизации методологии гериатрической хирургии.

Внедрение в клиническую практику дифференцированных лапароскопических методик на основе тщательного предоперационного профилирования пациентов пожилого и старческого возраста с позиций коморбидности, функционального статуса и специфики основного заболевания создает предпосылки для повышения безопасности и результативности хирургических вмешательств у данной категории больных. Вместе с тем, сохраняющийся риск послеоперационных осложнений и неоднородность реабилитационных траекторий обосновывают целесообразность дальнейшего совершенствования протоколов периоперационного ведения с акцентом на предикторы неблагоприятного прогноза, верифицированные по результатам выполненного анализа. В целом, представленное исследование демонстрирует эффективность и обоснованность инновационных лапароскопических технологий в арсенале современной оперативной гастроэнтерологии и геронтологии. Широкое внедрение подобных подходов с акцентом на персонификацию лечебно-диагностических алгоритмов представляется магистральным направлением дальнейшего совершенствования хирургической помощи населению старших возрастных групп.

ЛИТЕРАТУРА

1. Antoniou S.A., Antoniou G.A., Koch O.O., Pointner R., Granderath F.A. Laparoscopic colorectal surgery confers lower mortality in the elderly: a systematic review and meta-analysis of 66,483 patients// Surg. Endosc. 2015. Vol. 29(2). P.322–333. DOI: 10.1007/s00464-014-3672-x.
2. Ballian N., Yamane B., Leverson G., Harms B., Heise C.P., Foley E.F., Kennedy G.D. Body mass index does not affect postoperative morbidity and oncologic outcomes of total mesorectal excision for rectal adenocarcinoma// Ann. Surg. Oncol. 2010. Vol. 17(6). P.1606–1613. DOI: 10.1245/s10434-010-0908-4.
3. Manceau G., Hain E., Maggiori L., Mongin C., Prost A la Denise J., Panis Y. Is the benefit of laparoscopy maintained in elderly patients undergoing rectal cancer resection? An analysis of 446 consecutive patients// Surg. Endosc. 2017. Vol. 31(2). P.632–642. DOI: 10.1007/s00464-016-5009-4.
4. Zhao F.Q., Jiang Y.J., Xing W., Pei W., Liang J.W. The safety and prognosis of radical surgery in colorectal cancer patients over 80 years old// BMC Surg. 2023. Vol. 23(1). P.72. DOI: 10.1186/s12893-023-01965-0.
5. Seishima R., Miyata H., Okabayashi K., Hasegawa H., Tsuruta M., Shigeta K., Monno M., Yamashita Y., Inomata M., Wakabayashi G., Kakeji Y., Kitagawa Y., Watanabe M. Safety and feasibility of laparoscopic surgery for elderly rectal cancer patients in Japan: a nationwide study// BJS Open. 2021. Vol. 5(2):zrab007. DOI: 10.1093/bjsopen/zrab007.
6. Kong M., Chen H., Shan K., Sheng H., Li L. Comparison of Survival Among Adults With Rectal Cancer Who Have Undergone Laparoscopic vs Open Surgery: A Meta-analysis// JAMA Netw Open. 2022. Vol. 5(5):e2210861. DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2022.10861.
7. Ishibe A., Ota M., Fujii S., Suwa Y., Suzuki S., Suwa H., Momiyama M., Watanabe J., Watanabe K., Taguri M., Kunisaki C., Endo I. Midterm follow-up of a randomized trial of open surgery versus laparoscopic surgery in elderly patients with colorectal cancer// Surg. Endosc. 2017. Vol. 31(10). P.3890–3897. DOI: 10.1007/s00464-017-5418-z.
8. Fujii S., Ishibe A., Ota M., Yamagishi S., Watanabe J., Suwa Y., Kunisaki C., Endo I. Long-term results of a randomized study comparing open surgery and laparoscopic surgery in elderly colorectal cancer patients (Eld Lap study)// Surg. Endosc. 2021. Vol. 35(10). P.5686–5697. DOI: 10.1007/s00464-020-08026-0.

9. Hinoi T., Kawaguchi Y., Hattori M., Okajima M., Ohdan H., Yamamoto S., Hasegawa H., Horie H., Murata K., Yamaguchi S., Sugihara K., Watanabe M. Japan Society of Laparoscopic Colorectal Surgery. Laparoscopic versus open surgery for colorectal cancer in elderly patients: a multicenter matched case-control study// Ann. Surg. Oncol. 2015. Vol.22(6). P.2040–2050. DOI: 10.1245/s10434-014-4172-x.
10. Barina A., Nardelli M., Gennaro N., Corti M.C., Marchegiani F., Basso C., Ferroni E., Fedeli U., Spolverato G., Pucciarelli S. Impact of laparoscopic approach on the short-term outcomes of elderly patients with colorectal cancer: a nationwide Italian experience// Surg. Endosc. 2020. Vol. 34(10). P.4305–4314. DOI: 10.1007/s00464-019-07197-9.
11. Li Y., Wang S., Gao S., Yang C., Yang W., Guo S. Laparoscopic colorectal resection versus open colorectal resection in octogenarians: a systematic review and meta-analysis of safety and efficacy// Tech. Coloproctol. 2016. Vol.20(3). P.153–162. DOI: 10.1007/s10151-015-1419-x.
12. Lim S.W., Kim Y.J., Kim H.R. Laparoscopic surgery for colorectal cancer patients who underwent previous abdominal surgery// Surg. Endosc. 2017. Vol.31(12). P.5472–5480. DOI: 10.1007/s00464-017-5624-8.

© Чубовский Андрей Иванович (chubovskiy14@mail.ru); Кивва Андрей Николаевич (kivva@aaanet.ru);
Евлахова Инесса Сергеевна (inessa.ev@yandex.ru); Загреба Игорь Владимирович (Lesi.787878@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

Наши авторы

Alekseev A. — Moscow State Technical University. names Bauman

Alekseeva S. — Applicant, «North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova»; biology teacher of Municipal Educational Institution Secondary School №20 named after Hero of the Soviet Union F.K. Popova, Yakutsk

Alieva S. — Assistant, First Saint Petersburg State Medical University named after I.P. Pavlov, Saint Petersburg

Bekkeldieva N. — postgraduate student, N.N. Petrov National Medical Research Center of Oncology

Borisenko D. — Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov

Borisenko D. — Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov

Chubovskiy A. — PhD, Associate Professor, Rostov State Medical University, Ministry of Public Health of Russia, Rostov-on-Don

Dubina E. — Doctor of Biological Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Federal Scientific Center of Rice, Krasnodar

Elbaeva A. — MD, PhD, Associate Professor, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov, Nalchik, Russia

Evlakhova I. — PhD, Associate Professor, Rostov State Medical University, Ministry of Public Health of Russia, Rostov-on-Don

Gabrielyan G. — Senior Lecturer, MIREA — Russian Technological University

Galimurov A. — Postgraduate, Ufa University of Science and Technology

Goryachkin B. — candidate of technical Sciences, associate Professor, Moscow State Technical University names Bauman

Grishchenko S. — Associate, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny

Gryzlov V. — Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I

Guzeeva S. — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Tyumen Industrial University

Our authors

Gvozdeva Ya. — Bauman Moscow State Technical University

Ilyin A. — RTU MIREA

Isaeva I. — Senior Lecturer, MIREA — Russian Technological University

Ivanin A. — Candidate of Technical Sciences, doctoral student, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny

Ivanov V. — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Far Eastern State Transport University of the Russian Federation

Kharaeva Z. — MD, Doctor of Sciences, Professor, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov, Nalchik, Russia

Khokonova T. — MD, PhD, Associate Professor, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov, Nalchik, Russia

Kivva A. — Doctor of Medical Sciences, professor, Rostov State Medical University, Ministry of Public Health of Russia, Rostov-on-Don

Komarov K. — MIREA - Russian Technological University

Korotkov E. — PhD, professor, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute); Federal Research Centre «Fundamentals of Biotechnology» of the Russian Academy of Sciences (Moscow)

Korotkova M. — PhD, docent, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

Koryagin S. — PhD, Associate Professor, MIREA — Russian Technological University

Koryagina V. — MIREA - Russian Technological University

Kostenko D. — Postgraduate, junior researcher, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute); Federal Research Centre «Fundamentals of Biotechnology» of the Russian Academy of Sciences (Moscow)

Kovalenko K. — North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov

Kozhiev A. — PhD student, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow

Krivorotko P. — Doctor of Medical Sciences, Professor, N.N. Petrov National Medical Research Center of Oncology

Kulagina N. — Branch of Samara state technical University in Syzran

Kurovsky S. — Head of the Research Department LLC «Higher School of Education»

Luk'yanov A. — Branch of Samara state technical University in Syzran

Malina S. — Bauman Moscow State Technical University

Matsipudra P. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Mishin D. — Head of the Editorial and Publishing Department LLC «Higher School of Education»

Oznobikhina A. — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Tyumen Industrial University

Plotnikov S. — PhD, Associate Professor, RTU MIREA

Poliskikh S. — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great Voronezh

Potapova K. — Senior Lecturer, MIREA — Russian Technological University

Remarchuk V. — doctor of philosophical Sciences, Professor, Bauman Moscow State Technical University

Reshetnik G. — Candidate of Biological Sciences, Teacher, V.I. Vernadsky Crimean Federal University; Simferopol

Rusakov A. — Senior lecturer, MIREA — Russian Technological University

Rusinova A. — Obstetrician-gynecologist, Office of Higher Professional Education No. 1

Salikhov M. — PhD Student, Higher Education «ITMO University»

Sataieva T. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Teacher, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

Savelieva Yu. — candidate of technical sciences, Branch of Samara state technical University in Syzran

Semiglazov V. — Doctor of Medical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor N.N. Petrov National Medical Research Center of Oncology

Shalobanov S. — Doctor of Technology, professor, Pacific National University, Khabarovsk

Shalobanov S. — PhD in Engineering Science, associate professor, Pacific National University, Khabarovsk

Sheyko E. — Candidate of Biological Sciences, Teacher, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

Shmakov V. — PhD, Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Smagliy N. — Assistant, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

Sokhroкова D. — Assistant, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov, Nalchik, Russia

Sokhroкова N. — resident, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia

Sumenkova O. — Graduate student, Tyumen Industrial University

Teslyuk V. — PhD student, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow

Tretyakova I. — Doctor of Medical Sciences, Federal State Budget Educational institution «North Ossetian state Medical Academy» Ministry of Health of the Russian Federation (Vladikavkaz)

Uvarov M. — Graduate student, A.N. Kosygin Russian State University (Technology. Design. Art), Moscow

Vaulin V. — candidate of pedagogical sciences, Branch of Samara state technical University in Syzran

Yatsenko E. — Postgraduate student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)», Moscow

Yevtushenko I. — Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin», Krasnodar

Zagreba I. — Doctor of Medical sciences, Associate Professor, Rostov-on-Don Municipal Emergency Aid Hospital; Rostov State Medical University, Ministry of Public Health of Russia, Rostov-on-Don

Zernov K. — Candidate of Medical Sciences N.N. Petrov National Medical Research Center of Oncology

Zhilyakov E. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Tyumen Industrial University

Zhukov E. — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Pacific National University, Khabarovsk

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).