

ISSN 2223-2966



СОВРЕМЕННАЯ НАУКА:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 6-2 2025 (ИЮНЬ)

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>

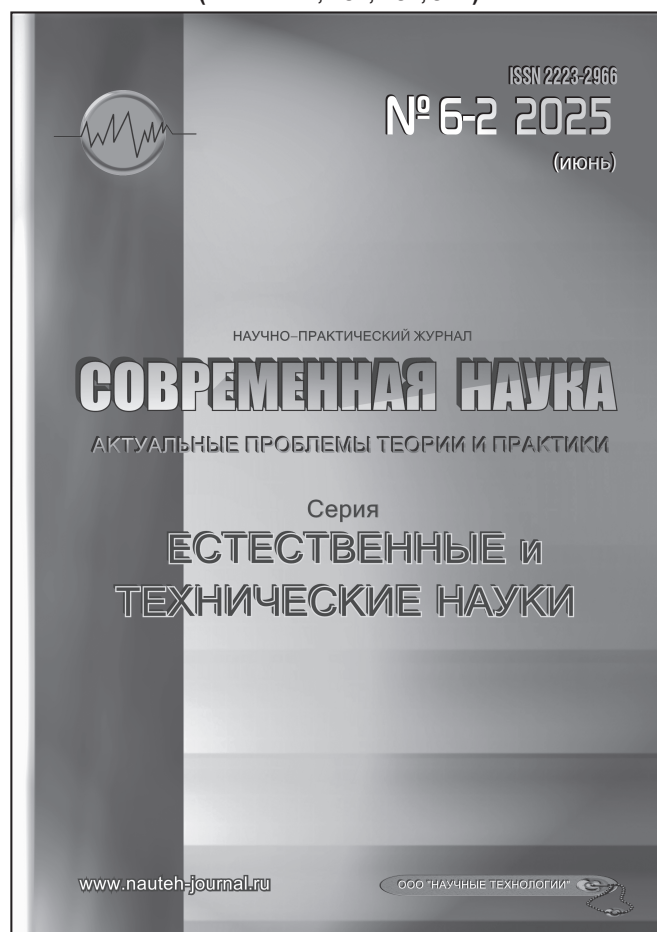
Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия.

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 30.06.2025 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

Барыбкина М.Н. — Особенности распространения насекомых в Арктике в условиях климатических трансформаций
Barybkina M. — Features of insect distribution in the Arctic under climatic transformations7

Безруких А.И., Безруких Е.И., Сизонова Н.А., Мосина Л.В. — Использование информационных технологий для оценки рекреационных проблем территории на основе почвенно-экологических анализов на примере ЛОД РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева
Bezrukih A., Bezrukikh E., Sizonova N., Mosina L. — The use of information technologies to assess recreational problems of the territory on the basis of soil and ecological analyses on the example of the LOD RGAU of the Ministry of Agriculture named after K.A. Timiryazev20

Зими́на А.А., Гринев А.Б. — Артефакты секвенирования в данных Oxford Nanopore Technology: ложноположительное обнаружение *Naegleria Fowleri* и его биоинформатическая верификация
Zimina A., Grinev A. — Oxford Nanopore Technology data sequencing artifacts: false-positive detection of *Naegleria Fowleri* and its bioinformatics validation29

Лазарева В.Г., Сератирова В.В., Дудников В.Ю. — Ботаническое разнообразие Сосногорского района Республики Коми
Lazareva V., Seratirova V., Dudnikov V. — Botanical diversity of the Sosnogorsk region of the Komi Republic33

Мацаева О.Д., Гринев А.Б. — Влияние противомаларийных препаратов на морфологию паразитов рода *plasmodium*
Matsaeva O., Grinev A. — Effect of antimalarial drugs on the morphology of parasites of the genus *plasmodium*41

Польских С.В. — Современный статус, морфологические особенности и распространение дереворазрушающих грибов — возбудителей белых гнилей

Poliskikh S. — Current status, morphological features and distribution of wood-destructing fungi — causatives of white rot45

Информатика, вычислительная техника и управление

Валеев С.С., Чжан Силу — Управление траекторией сотрудников компании и большие данные
Valeev S., Zhang Xilu — Managing the trajectory of company employees and big data50

Гантц И.С., Петрунин М.А. — Особенности проектирования информационной системы поддержки организации обучения водителей в автошколах
Gantts I., Petrunin M. — Features of designing an information system to support the organization of driver training in driving schools53

Глинкин М.О., Новоселова О.В. — Алгоритм формирования трехмерного графического представления моделей в целом по методологии автоматизации интеллектуального труда
Glinkin M., Novoselova O. — Algorithm for constructing three-dimensional graphical representation of models as a whole for methodology of automation of intellectual labor57

Глинкин М.О. — Разработка средств поддержки визуального представления моделей в целом по методологии автоматизации интеллектуального труда в интегрированной среде проектирования
Glinkin M. — Development of visualization support tools for holistic model representation based on the methodology of automation of intellectual labor in an integrated design environment71

Горбачев И.В., Рытов М.Ю., Голембиовская О.М. — Разработка методики проведения аудита информационной безопасности в организациях финансового сектора
Gorbachev I., Rytov M., Golembiovskaya O. — Development of a methodology for conducting an information security audit in financial sector organizations79

Завитаев К.В., Ягольницер О.В. — Модели расчета концентраций вредных веществ в приземном слое атмосферы <i>Zavitaev K., Yagolnitzer O.</i> — Models for calculating concentrations of harmful substances in the surface layer of the atmosphere84	Максимов Д.Р., Черваков Ф.С. — Автоматическое формирование аналитических отчетов о студенческой успеваемости на основе дообученной языковой модели GPT-2 <i>Maksimov D., Chervakov Ph.</i> — Automatic generation of analytical reports on student performance based on the advanced GPT-2 language model 135
Завитаев К.В., Ягольницер О.В. — Оценка качества моделей Гаусса и MPP-2017 с помощью применения метода регрессионного анализа <i>Zavitaev K., Yagolnitzer O.</i> — Quality assessment of Gauss and MRR-2017 models by applying the method of regression analysis91	Михайлов В.Д. — Алгоритм генерации рекомендаций по исправлению отклонений в табличных данных <i>Mikhaylov V.</i> — Algorithm for generating recommendations for correcting anomalies in tabular data 141
Коваценко И.Н., Печенкин В.В. — Моделирование смежных регулируемых перекрестков с применением композиции сетей Петри с временными ограничениями активации переходов <i>Kovatsenko I., Pechenkin V.</i> — Modelling of adjacent controlled intersections using a composite Petri net with temporal constraints on transition activation98	Михеева Е.О., Ромашкова О.Н., Чискидов С.В. — Функциональная модель цифрового двойника виртуальной компьютерной лаборатории <i>Mikheeva E., Romashkova O., Chiskidov S.</i> — Functional model of a digital double of a virtual computer laboratory 145
Кошелев Н.Д., Новиков К.С., Юрков Н.К. — Глубокое обучение в задачах интерпретации и агрегации природной информации <i>Koshelev N., Novikov K., Yurkov N.</i> — Deep learning in natural information interpretation and aggregation tasks 105	Молькова Л.Ю., Гофман М.В. — Методы защиты маркированного сетевого потока с использованием технологии лоскута: анализ устойчивости и применения <i>Molkova L., Gofman M.</i> — Methods for protecting marked network traffic using the patchwork technique: resilience analysis and application 152
Крючков А.А., Пастухова Ю.И. — Выявление неустойчивых кубит квантового компьютера на стадии инициализации квантового регистра <i>Kryuchkov A., Pastuhova Ju.</i> — Identification of unstable qubits of a quantum computer at the initialization stage of a quantum register 114	Новиков К.С., Юрков Н.К., Кошелев Н.Д. — Архитектуры нейро-нечётких сетей для анализа и управления пространственно-распределёнными экологическими процессами <i>Novikov K., Yurkov N., Koshelev N.</i> — Neuro-fuzzy network architectures for analysis and control of spatially distributed environmental processes 159
Куликова О.В., Пинигин А.С. — Обнаружение сетевых атак с использованием метода случайного леса в условиях несбалансированных данных <i>Kulikova O., Pinigin A.</i> — Detection of network attacks using the random forest method in conditions of unbalanced data 123	Новиков К.С., Юрков Н.К., Кошелев Н.Д. — Статистические и машинные подходы к управлению динамическими процессами на основе гибридных нейросетевых архитектур <i>Novikov K., Yurkov N., Koshelev N.</i> — Statistical and machine learning approaches to dynamic process control based on hybrid neural network architectures 165
Ломоносов Г.А., Брысин А.Н., Кириллина Ю.В., Лаврушин В.М. — Система безопасного хранения и передачи файлов на основе Рида-Соломона <i>Lomonosov G., Brysin A., Kirilina Y., Lavrushin V.</i> — Secure file storage and transmission system based on Reed-Solomon 128	Попов В.М. — Интегрированная система детектирования фишинговых ресурсов на основе комбинирования методологий Phishark и CANTINA в чат-ботах поддержки

<i>Popov V.</i> — Integrated phishing detection system based on combined Phishark and CANTINA methodologies in support chatbots.....	170	<i>Trushin S., Petrunev E., Shmakov K.</i> — Object detection and analysis system using neural networks and integration with lidar and omnidirectional cameras.....	207
Ребров Е.А. — Акустический контроль процесса фрезерования на станках с числовым программным управлением <i>Rebrov E.</i> — Acoustic control of the milling process on numerically controlled machines.....	176	Уваров К.А. — Анализ внимания человека на основе данных ЭЭГ с использованием машинного обучения <i>Uvarov K.</i> — Analysis of human attention based on EEG data using machine learning	214
Русаков А.М., Бобырь-Бухановский А.И. — Исследование интеллектуальных методов анализа журналов событий для обеспечения информационной безопасности <i>Rusakov A., Bobyr-Bukhanovsky A.</i> — Research of intelligent methods for analyzing event logs for information security	180	Уланов К.А. — Влияние синтетических потоковых данных, созданных генеративными моделями машинного обучения, на аналитику и методы раннего выявления отклонений <i>Ulanov K.A.</i> — The impact of synthetic streaming data generated by generative machine learning models on analytics and early detection methods	221
Соколов А.С., Артемова С.В., Потанова Д.А., Брысин А.Н. — Математическое моделирование алгоритма клонального отбора в искусственных иммунных системах для обнаружения атак типа отказа в обслуживании <i>Sokolov A., Artemova S., Potapova D., Brysin A.</i> — Mathematical modeling of the clonal selection algorithm in artificial immune systems for the detection of denial-of-service attacks	187	Феклисов В.И. — Создание оценочного средства в рамках независимой оценки квалификаций: вызовы и пути автоматизации через искусственный интеллект <i>Feklisov V.</i> — Creation of assessment tools within independent qualification assessment: challenges and automation pathways through artificial intelligence	224
Суздальский Д.А. — Обоснование применения математического аппарата когнитивного моделирования для решения задач анализа функционирования и прогнозирования поведения слабоструктурированных и плохо формализуемых систем <i>Suzdalsky D.A.</i> — Substantiation of the use of mathematical apparatus of cognitive modeling for solving problems of analysis of functioning and forecasting behavior of poorly structured and poorly formalized systems	193	Хананов К.Р. — Роль блокчейна в создании устойчивых систем защиты данных <i>Khananov K.</i> — The role of blockchain in creating sustainable data protection systems	228
Тарасов А.Г., Ковальчук А.С. — Описание режимов алгоритма оценки параметров сигнально-кодовой конструкции в имитационной модели радиоканала спутниковой связи <i>Tarasov A., Kovalchuk A.</i> — Description of the modes of the algorithm for estimating the parameters of the signal-code structure in the simulation model of a satellite radio channel	202	Хананов К.Р. — Использование интернет вещей (IIoT) на промышленном производстве для мониторинга выбросов углекислого газа (CO ₂) <i>Khananov K.</i> — Using the internet of things (IIoT) in industrial production to monitor carbon dioxide (CO ₂) emissions	233
Трушин С.М., Петрунев Е.А., Шмаков К.А. — Система анализа и обнаружения объектов с использованием нейронных сетей и интеграцией с lidar и всенаправленными камерами		Черников А.В. — Гибридная модель с подкреплением, нечеткой логикой и эволюцией для прогноза температуры трансформатора <i>Chernikov A.</i> — A hybrid reinforcement learning, fuzzy logic, and evolutionary model for transformer temperature forecasting	238
		Шарара Симбараше — Оценка температуры экструзии как управляющего параметра для снижения выбросов летучих органических соединений при трехмерной печати методом послойного наплавления	

Sharara Simbarashe — Assessment of extrusion temperature as a control parameter for reducing volatile organic compound emissions in fusion deposition modelling 3d printing 241

Шахов М.А. — Сравнительный анализ моделей организации работы команды в системах управления версиями
Shakhov M. — Comparative analysis of team organization models in version control systems .. 245

Шемет А.М., Уленгова Т.Г. — Решение некоторых задач химической кинетики с применением дифференциальных уравнений
Shemet A., Ulengova T. — Solving some problems of chemical kinetics using differential equations 249

Ярощук П.О. — Разработка комбинированной архитектуры построения карты на основе SLAM-алгоритмов и глубокого обучения
Yaroschuk P. — Development of a hybrid mapping architecture for ground vehicle autopilot systems 254

Клиническая медицина

Бараташвили К.Г. — Сравнительная оценка влияния A-PRF, L-PRF на заживление и профилактику постоперационных осложнений после удаления ретинированных третьих моляров
Baratashvili K. — Comparative assessment of the effect of A-PRF and L-PRF on healing and prevention of postoperative complications after extraction of impacted third molars 259

Иванова Е.Г. — Климатический фактор и заболеваемость сердечно-сосудистой патологией
Ivanova E. — The climatic factor and the incidence of cardiovascular pathology 264

Кинаш И.Н., Животенко А.П., Верхозина Т.К., Ипполитова Е.Г., Цысляк Е.С. — Изменение биоритмов ЭЭГ у пациентов с нейропатическим болевым синдромом в нижних конечностях при эпидуральной нейростимуляции
Kinash I., Zhivotenko A., Verkhosina T., Ippolitova E., Tsyslyak E. — Alteration of EEG biorhythms in patients with neuropathic pain syndrome in the lower extremities during epidural neurostimulation 269

Романовская А.В., Аржаева И.А., Паршин А.В., Михайлова А.В., Классов А.М., Немцева Л.А. — Эффективность комбинированной терапии в лечении эндометриоза: проспективное когортное исследование
Romanovskaya A., Arzhaeva I., Parshin A., Mikhailova A., Klassov A., Nemtseva L. — Efficacy of combined therapy in the treatment of endometriosis: a prospective cohort study. 274

Русинова А.К. — Инновационные подходы к неинвазивной диагностике эндометриоза: конструирование и отбор факторов с использованием методов машинного обучения в клинической практике
Rusinova A. — Innovative approaches to non-invasive endometriosis diagnosis: construction and selection of factors using machine learning methods in clinical practice 283

Рябошапко А.И., Балашова М.Е., ДAUDOVA Д.А., Чубанова А.Ф., Абдурахманова З.А., Классов А.М. — Сердечно-сосудистые заболевания у беременных: диагностика и тактика ведения в условиях женской консультации
Ryaboshapko A., Balashova M., Daudova D., Chubanova A., Abdurakhmanova Z., Klassov A. — Cardiovascular diseases in pregnant women: diagnosis and management tactics in antenatal clinic settings 289

Семенова И.А., Поликарпов Е.К., Миролюбова О.А. — Синдром Фредерика у коморбидного пациента с малосимптомным течением covid-19
Semenova I., Polikarpov E., Mirolyubova O. — Frederick syndrome in a comorbid patient with a low-symptomatic course of covid-19 294

Юсупова С.А. — Предраковые заболевания красной каймы губ у жителей разных климатогеографических зон Республики Дагестан
Yusupova S. — Precancerous diseases of the vermilion border of the lips among residents of different climatic and geographical regions of the Republic of Dagestan 300

Наши авторы 304

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НАСЕКОМЫХ В АРКТИКЕ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАЦИЙ

FEATURES OF INSECT DISTRIBUTION IN THE ARCTIC UNDER CLIMATIC TRANSFORMATIONS

M. Barybkina

Summary. The Arctic zone of Russia possesses enormous reserves of mineral resources. Climate change has led to a transformation of the usual air mass routes, amplified the greenhouse effect due to the thawing of permafrost and the release of methane, and Arctic territories are shrinking due to glacier melting and coastal erosion. This affects both the economic and environmental situation in Russia and causes irreparable damage to the Arctic biosphere. The degradation of ecosystems due to rapid climate change contributes to increased vegetation productivity and the «greening» of the Arctic. Such processes have a negative impact on the habitat of Arctic flora and fauna of many species. Over the past 10 years, a regulatory framework for the development of the Arctic region has been established, and the Strategy for the Development of the Arctic Zone of the Russian Federation until 2035 has been adopted. Following the adopted decisions, it is now necessary to improve the network of protected areas of various profiles not only on land but also at sea, particularly in Novaya Zemlya, Vaigach, the Bolshezemelskaya tundra, Yamalo-Nenets, and Chukotka, as well as to begin organizing protected marine areas in the Barents and Kara seas. Soon, the development of natural resources in the Arctic region is expected to become an important direction of Russia's state policy.

Keywords: Arctic zone of Russia, climate, greenhouse effect, global warming, «greening», arctic fauna, insects, greenhouse gases, territory pollution, natural resources, protected areas, state policy.

Барыбкина Мария Николаевна

Кандидат биологических наук, Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова
kved@list.ru

Аннотация. Арктическая зона России располагает огромными запасами полезных ископаемых. Изменение климата привело к трансформации привычных маршрутов воздушных масс, усилило парниковый эффект из-за таяния вечной мерзлоты и выделения метана, арктические территории сокращаются из-за таяния ледников и береговой эрозии. Это влияет как на экономическую, так и на экологическую ситуацию в России и наносит непоправимый ущерб арктической биосфере. Деградация экосистем из-за быстрого изменения климата, способствует увеличению продуктивности растительности, «озеленению» Арктики. Подобные процессы оказывают негативное влияние на среду обитания арктической флоры и фауны многих видов. За последние 10 лет создана нормативная база развития Арктического региона, принята Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации на период до 2035 года. Следуя принятым решениям, в настоящее время необходимо совершенствовать сеть заповедных территорий различного профиля не только на суше, но и на море, в частности на Новой Земле, Вайгаче, в Большеземельской тундре, на Ямале, Чукотке, необходимо приступить к организации охраняемых акваторий в Баренцевом и Карском морях. В ближайшем будущем освоение природных ресурсов арктического региона должно стать важным направлением государственной политики России.

Ключевые слова: Арктическая зона России, климат, парниковый эффект, глобальное потепление, «озеленение», арктическая фауна, насекомые, парниковые газы, загрязнение территории, природные ресурсы, охраняемые территории, государственная политика.

Введение

Арктика — единственная физико-географическая область на Земле, граничащая с Северным полюсом и включающая окраины материков Евразии и Северной Америки, почти весь Северный Ледовитый океан с островами, а также прилегающие части Атлантического и Тихого океанов. Южная граница Арктики совпадает с южной границей тундровой зоны. Площадь Арктики насчитывает около 27 млн км². Площадь российского сектора Арктики около 9 млн км² (из них 6,8 млн км² — морская акватория).

Российский сектор включает в себя основные участки материковой тундры, не покрытые ледниками, девять морей и значительную часть глубоководного бассейна

Северного Ледовитого океана. На материке и на островах в значительном долготном и широтном диапазоне четко выражены ландшафтно-зональные категории: переходная лесотундра, тундровая зона с подзонами южных, типичных и арктических тундр, зона полярных пустынь, преимущественно островной природы, а также их высокогорные аналоги на прилегающих территориях [1, с. 337].

В настоящее время важнейшей задачей арктических исследований является оценка состояния биоразнообразия. К ним относятся таксономические исследования, описания новых видов и других таксонов, составление флористических списков, номенклатуры и классификации форм биогеографической и биоценотической организации жизни, их картирование и создание баз данных.

Эта информация считается необходимой основой для разработки принципов и технологий сохранения и восстановления различных форм организации жизни во всем их многообразии [2, с. 25].

Современные исследования биоразнообразия Арктики охватывают многие аспекты организации биоты. Их можно сгруппировать следующим образом:

- Инвентаризация таксономического состава арктической биоты и создание баз данных по различным группам организмов зонального и регионального масштаба;
- Классификация экологического разнообразия органического мира Арктики, создание систем жизненных форм, адаптивных типов и стратегий в экстремальных условиях;
- Типология ценотических комплексов, растительного покрова и экосистем с учетом зональной и субзональной структуры Арктики; экологическое картографирование тундровой зоны и вод Северного Ледовитого океана;
- Биотогенез; происхождение, эволюция, климатогенные и антропогенные изменения флоры, фауны и экосистем Арктики, а также в связи с проблемой прогнозирования результатов глобальных изменений и последствий различных форм человеческой деятельности;
- Структура, устойчивость и динамика сообществ и экосистем Арктики: особенности механизмов их регулирования в условиях прогрессирующего сокращения биоразнообразия;
- Популяционная экология: абиотические, внутривидовые и ценотические механизмы устойчивости и регуляции динамики популяций, в том числе в связи с проблемами антропогенного воздействия и хозяйственного использования;
- Проблема внутривидового разнообразия в экстремальных условиях при низком видовом богатстве;
- Проблемы восстановления и обогащения компонентов арктического биоразнообразия: биоэкологические и адаптивно-физиологические принципы;
- Научные принципы охраны природы в высоких широтах [2, с. 12].

Научные исследования биоразнообразия Российской Арктики

Ведущую роль в изучении арктической биоты принадлежит следующим научно-исследовательским организациям и институтам РАН:

- Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН;
- Зоологический институт РАН;
- Мурманский морской биологический институт КМЦ РАН;

- Институт биологических проблем Севера Дальневосточного отделения РАН;
- Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН;
- Институт экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН;
- Институт географии РАН;
- Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН;
- Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН;
- Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН;
- Институт микробиологии имени С.Н. Виноградского РАН;
- Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН;
- Кольский научный центр РАН;
- Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова;
- Заповедник «Остров Врангеля»;
- Природный заповедник «Озеро семи островов»;
- Заповедник «Усть-Ленский»;
- «Таймырский» заповедник и др.

По результатам исследований различных аспектов биоразнообразия, особенно систематики живых организмов арктической зоны, Россия, безусловно, опережает все остальные страны вместе взятые. В Ботаническом институте В.Л. Комарова РАН специалисты проводят исследования по всем группам арктической флоры. Они разрабатывают систематику арктических растений, а также сложные проблемы северной флористики и фитоценологии. В институтах Уральского отделения и Сибирского отделения РАН работают многие первоклассные систематики и флористы по различным группам флоры и микофлоры [3].

В Зоологическом институте РАН работают специалисты по всем основным группам животных арктической фауны: млекопитающим, рыбам, различным группам пресноводных и морских беспозвоночных, насекомым, доминирующим в арктических комплексах.

В Институте экологии и эволюции А.Н. Северцова РАН работают высококвалифицированные специалисты в области систематики и экологии различных групп арктической фауны., в частности, по морским беспозвоночным, клещам, коллемболам, птицам, млекопитающим, в Институте экологии растений и животных УрО РАН — по млекопитающим, птицам, насекомым, на кафедрах МГУ — по различным группам беспозвоночных, в частности, по круглым червям, кольчатым червям и другим таксонам беспозвоночных, в Национальном научном центре морской биологии имени А.В. Жирмунского ДВО РАН — по ракообразным, немуртинам и щетинкочелюстным. Ряд научных коллективов готовят отчеты, содержа-

щие информацию, в том числе об арктической биоте, без специального изучения компонентов арктической фауны и флоры. В качестве примера можно привести большой коллектив энтомологов Института биологии и почвоведения Дальневосточного отделения РАН, составивший уникальный многотомный определитель насекомых Дальнего Востока.

Кольский научный центр Российской академии наук, отметивший в 2020 году свое 90-летие, является единственным в Российской Федерации академическим научным центром, расположенным за Полярным кругом и нацеленным на проведение арктических исследований. Он был основан в 1930 г. академиком А.Е. Ферсманом как Хибинская горная станция Академии наук СССР и исторически был первым региональным учреждением Академии наук. В настоящее время Кольский научный центр РАН объединяет 10 научных центров и институтов с общей численностью около 1300 человек. Ученые центра проводят исследования по широкому кругу проблем, связанных с изучением Российского Севера и Арктической зоны России [4, с. 7].

Сеть стационаров и опорных пунктов играет важную роль в развитии исследований арктического биоразнообразия. В отличие от США, где исследования в основном ведутся в небольшом количестве хорошо оснащенных и давно существующих лабораторий, в России уже давно подобные исследования осуществляются в экспедиционных условиях с участием ботаников, зоологов, почвоведов и микробиологов. Маршруты экспедиций охватывали обширные территории и водные объекты. Кроме того, с 1960-х годов интенсивно развиваются стационарные исследования в специально организованных базах в заповедниках и полярных станциях [5, с. 1447].

С тех пор Таймыр, остров Врангеля и юг Ямала стали модельными территориями, на которых проведены многочисленные флористические, фаунистические и популяционные исследования. Объем и разнообразие биологической информации, собранной в этих областях, сейчас беспрецедентны при сравнении уровня знаний о компонентах биологического разнообразия.

В настоящее время создана фактическая основа для баз данных по таксономическому и видовому разнообразию биоты российского сектора Арктики, которые смогли бы охватывать практически все основные таксоны классового ранга.

В то же время существование некоторых групп характеризуется слабым развитием отдельных таксонов или их арктических фракций. Это относится ко всем простейшим, к таким группам животных, как нематоды, некоторым семействам клещей и насекомым [6, с. 1157].

В настоящее время таксоны детально изучены и составлены полные списки видов для всей Арктики; есть большие сводки по евразийскому и американскому секторам. На уровне классов — это млекопитающие, птицы, рыбы, все группы иглокожих, кольчатые черви, двудольные и однодольные, печеночники.

Существуют списки видов и их описания для отдельных регионов. Некоторые группы таксонов арктической фауны изучены весьма неполно, а идентификация некоторых видов затруднена. К этим таксонам относится класс насекомых в целом и, в частности, отдельные его отряды, прежде всего *Lepidoptera*, *Diptera* и *Hymenoptera*, которым посвящено множество публикаций, однако ряд их крупных семейств в пределах арктической фауны всё еще очень мало изучен. В эту категорию входят ногохвостки, многие группы морской фауны, особенно ракообразные и улитки [6, с. 1160].

Уровень исследований в отдельных регионах Арктики также весьма неоднороден. Так, в морской части биоты еще недостаточно изучена фауна Восточно-Сибирского моря на фоне интенсивных и обширных исследований в водах Баренцева и частично Карского морей. Лишь в последнее время началась интенсивная обработка материалов по фауне моря Лаптевых. Северные пределы распространения морских животных, а также особенности видового состава сообществ и экологии гидробионтов в полярной части бассейна самых высоких широт изучены очень слабо.

Наиболее изучен состав наземной биоты на территориях Восточно-Европейского сектора, Южного Ямала, Таймыра, острова Врангеля и Чукотки. Но ряд важных территорий, таких как Гыданский полуостров и большая часть арктической Якутии, требуют организации специальных фаунистических и флористических исследований с привлечением профессиональных систематиков, флористов, фаунистов и биогеографов.

Оценка биоразнообразия арктической фауны России

Исследования российских ученых последних лет позволяют оценить видовое богатство всего органического мира Арктики. Подсчет общего состава всех основных таксонов высших эукариот дает число около 25000 видов, а, возможно, и 26000. Это соответствует чуть более 1,0 % описанных видов современных организмов. По основным показателям общее видовое разнообразие распределяется следующим образом: грибы — 3000, водоросли — 2000, лишайники — 2000, высшие растения — 2700, простейшие — 1500, многоклеточные животные — 13000 [5, с. 1426].

Около половины, скорее всего, до 60 % видового богатства арктической биоты приходится на животных.

Из них 6000 — наземного базирования. Если экстраполировать данные на всю Арктику, морскую фауну можно оценить в 6000–7000 видов [5, с. 1414].

В высоких широтах доля насекомых в животном мире снижается. В мировой фауне они составляют 71 % описанных видов, в тропической зоне, вероятно, еще выше, в умеренной зоне, по данным для России, более 60 %, а в Арктике около 25 % [6, с. 1159].

Основной особенностью структуры арктической биоты является уменьшение доли наиболее развитых таксонов и появление относительно примитивных групп на передовых позициях по показателям адаптивности и разнообразия, что особенно ярко проявляется в ландшафтах высоких широт. Доля истинно арктических видов в фауне и флоре наиболее высока у наиболее продвинутых таксонов (20–40 %) [2, с. 22].

В результате анализа собранных данных установлено, что наземная фауна и биота в целом в Арктике (тундра, полярные пустыни) все больше обедняются по мере продвижения на север и полностью исчезают в ледяной зоне [6, с. 1162].

Современное обеднение арктической и северной биоты — результат ледниково-биотической катастрофы, уничтожившей биоту практически всей Арктики, кроме острова Врангеля, отдельных районов Чукотки и Аляски (Берингия), части Якутии и, возможно, севера Гренландии и Земли Элсмira, где, по-видимому, также существовали рефугиумы. Большинство видов сохранилось в депрессивных тундрах и гольцах (тундры в горах), откуда они распространялись вновь и вновь. В конечном итоге все это привело к резкому обеднению видового разнообразия живых организмов Арктики и Севера в целом и вымиранию узких эндемиков.

Жуки, бабочки, шершни, шмели и клещи расширяют ареал обитания на север

Доля большинства классов животных и растений, показавших наибольший успех в приспособлении к арктическим условиям, составляет от 0,3 до 3,0 %. Это — двудольные растения, насекомые, улитки, костистые рыбы, птицы и млекопитающие. Вместе с тем регистрируется относительное богатство нескольких крупных таксонов высшего уровня.

Среди насекомых лучше других сумел приспособиться к экстремальным холодам отряд *Diptera*, он занимал лидирующие позиции по числу видов. А семейства *Chironomidae* и *Tipulidae* особенно хорошо адаптированы в Антарктиде [7, с. 41; 8, с. 21].

По мере продвижения на север происходит постепенное обеднение фауны *Diptera-Brachycera*. Наблюда-

ется следующее распределение: северная тайга — 42 семейства, кустарниковая тундра — 32 семейства, тундра типичная — 26 семейств, арктическая тундра — 19 семейств, о. Врангеля — 16 семейств, и (возможно) о. Котельный — 6 семейств.

Среди крупных мух представителей подотряда *Brachycera* первыми исчезают *Asilidae*, *Bombyliidae*, *Sarcophagidae*, *Tephritidae* и др.; за редким исключением, в тундру они не проникают. Как показали сборы на острове Котельном (Новосибирские о-ва), из подотряда *Brachycera* наиболее приспособленными к условиям Высокой Арктики оказались семейства *Empididae*, *Piophilidae*, *Heleomyzidae*, *Scathophagidae*, *Muscidae* и *Calliphoridae*.

Аномальный характер носит фауна Шпицбергена и ее самая северная находка — *Scathophaga furcata* (Say) в Рат-фьорде. Этот вид обычно не встречается в высоких широтах Арктики, но обычен в типичной тундре и тайге.

Темпы биологического прогресса арктических членистоногих очень низкие, что соответствует их относительной примитивности внутри типа членистоногих. О резком увеличении доли арктических видов в высокоширотных ландшафтах свидетельствуют ногохвостки, которым, как и многим другим активным обитателям почв, свойственны обширные ареалы и полизональность [9, с. 382]. В полярных пустынях всех секторов отмечено 37 видов коллембол, из них 24 (65 %) широкоарктических, в том числе 12 (32 %) типичных эварктов. Однако наиболее характерной особенностью тундровой биоты в целом следует считать именно наличие неарктических (бореальных, политональных, бореально-горных и др.) видов.

Главной особенностью арктической биоты является не столько самый низкий уровень ее таксономического разнообразия, сколько резкое снижение численности таксономических групп в пределах Арктики на небольшой территории. Так, на Таймыре, где зональные арктические ландшафты наиболее выражены от лесотундры до северной границы тундровой зоны на общем расстоянии около 700 км, численность видов птиц в отдельных регионах сокращается в семь раз, а жуелиц — в 15 раз [10, с. 230].

Coleoptera (жуки) — самый крупный отряд насекомых, уступают место двукрылым при полном освоении среды обитания в арктических условиях. Жесткокрылые составляют примерно 13 % энтомофауны тундровой зоны, но несколько семейств жуков сохраняют значительное видовое разнообразие и важную роль в высоких широтах [11, с. 1319].

На основе оригинальных данных, литературных сведений и материалов инвентаризационного сбора, с ис-

пользованием экстраполяции и аналогий установлены особенности таксономического и экологического разнообразия подотрядов, триб и семейств жесткокрылых, широтная зона распространения и северные границы распространения видов. Проанализированы особенности адаптации и ценотических связей [12, с. 64; 13, с. 435].

Влияние глобального потепления на состав арктической фауны

Из-за глобального потепления ареал насекомых-вредителей с каждым годом смещается дальше на север и их численность увеличивается.

Большой еловый короед *Ips typographus* — хорошо изученное насекомое, широко распространенное в хвойных лесах Евразии [14, с. 1317]. Большую часть своего жизненного цикла этот жук проводит в древесине ели, прогрызая длинные ходы под корой. Короеды обычно селятся на больных или полностью погибших деревьях. Однако если год особенно засушливый и теплый, жуков за сезон успевает вырасти вдвое больше, и они производят больше потомства. Необычайно большое количество насекомых в следующем году достигает половой зрелости и начинает атаковать не только ослабленные растения, но и здоровые.

Такой рост численности короедов произошел в России после аномально жаркого лета 2010 г.; эпидемия продолжалась до 2014 г. В Северной Европе наблюдается постоянный рост численности этих вредителей с 2018 г., а теплое лето 2021 г. спустя сезон превратилось в почти катастрофическую ситуацию [15, с. 36].

Теплое и сухое лето делает жуков плодовитыми, мягкая зима защищает их куколки, а на следующий год насекомые, приступив к размножению, производят еще больше потомства. И эта волна вредителей плавно движется севернее и севернее. Хотя в последние десятилетия короеды были редкостью на юге Финляндии, с 2018 г. они стали постоянной угрозой для хвойных лесов.

Стоит отметить, что, по расчетам ученых, в результате глобального потепления, леса Северной Европы сместятся на север, туда, где сегодня произрастают растения, характерные для тундровой зоны [16, с. 138]. Этот процесс известен по прошлым глобальным изменениям климата на Земле, когда короеды перемещались на север, где годовые температуры ограничивали их размножение на прежнем уровне [17].

За последнее десятилетие на севере было обнаружено множество южных видов насекомых и птиц, увеличились масштабы их миграции. Некоторые виды перемещаются на отдаленные арктические архипелаги с потоками теплого воздуха, например, бабочка-полифлора. В свою

очередь, сами арктические виды отступают на север, их ареалы сокращаются из-за потепления климата и разрушения вечной мерзлоты.

Остров Врангеля расположен на 71° северо-западной широты на границе Восточного и Западного полушарий и разделен на две почти равные части 180-м меридианом. Его преимущественно горная территория площадью 7670 км² относится к подзоне арктической тундры и входит в состав государственного природного заповедника «Остров Врангеля».

Начало изучению фауны шмелей (*Hymenoptera: Apidae, Bombus* Latr.) на острове Врангеля было положено полярниками Г.А. Ушаковым, А.И. Минеевым, А.Г. Ключе и Л.А. Портенко, которые в период с 1926 по 1939 гг. собрали не менее 86 экземпляров трех видов шмелей, находящихся сейчас в коллекциях Зоологического музея МГУ имени М.В. Ломоносова и Зоологического института РАН в г. Санкт-Петербурге [12, с. 69; 18, с. 1696; 19].

По итогам 2018–2020 гг. удалось идентифицировать на острове Врангеля посредством молекулярно-генетических исследований три арктических и евразийских вида шмелей: эндемичный подвид *B. glacialis marinae* Potapov et al., 2021, *B. (Alpinobombus) pyrrhopygus* Friese, 1902 и *B. (A.) hyperboreus* Schönherr, 1809.

Ученые Федерального научно-исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова УрО РАН (Архангельск) продолжают проводить масштабные исследования шмелей, ареалом обитания которых является Российская Арктика [20, с. 1122].

Высокоширотные шмели, пожалуй, единственные опылители цветковых растений. Доля пчел в общей численности насекомых-опылителей в Арктике весьма невелика: чем севернее расположены районы, тем меньше пчел. Поэтому урожай морошки, брусники и черники в тундровых экосистемах напрямую зависит от состояния популяций шмелей. Виды арктических шмелей реагируют на изменения климата и погоды.

Остров Колгуев (Ненецкий автономный округ), расположенный в восточной части Баренцева моря, ранее был белым пятном на энтомологической карте России. В 2018–2022 гг. были собраны и исследованы молекулярно-генетическими методами многочисленные образцы насекомых-опылителей. По результатам инвентаризации фауны шмелей на о-ве Колгуев идентифицированы *Bombus lapponicus*, *B. pyrrhopygus*, *B. balteatus* и *B. flavidus*, а также *B. jonellus*. Все они характерны для континентальной части ареала [21, с. 438; 22, с. 104].

На основе гена, кодирующего первую субъединицу фермента цитохром-с-оксидазы, установлены пути про-

исхождения фауны шмелей о-ва Колгуев. Исследования показали, что фауна шмелей — это молодая фауна послеледникового происхождения и скорее всего, такие шмели, появились на острове только в голоцене. Обнаруженные виды по геномным маркерам не отличаются от скандинавских и западносибирских популяций [19; 21, с. 435; 22, с. 107].

Шмели могут мигрировать на большие расстояния. Ширина Померанского пролива, отделяющего остров Колгуев от материка, составляет около 70 км. Однако это расстояние не представляет собой непреодолимого препятствия для насекомых. Имеются данные о том, что самки некоторых видов шмелей могут перелетать, например, из Нидерландов на Британские острова (около 475 км). Ранее энтомологи центра совместно с коллегами из других российских учреждений обнаружили популяции редкого ледникового шмеля *Bombus glacialis* на острове Врангеля и на Новой Земле.

Сотрудники Федерального научного центра комплексного изучения Арктики имени акад. Н.П. Лаверова Уральского отделения РАН обнаружили гнездо шершней в поселке Кеницы Архангельской области. Ученые связывают этот факт с глобальным потеплением.

Шершни — не единственные насекомые, расширяющие свой ареал на север Архангельской области. Ранее вдоль реки Койда был собран ряд видов арктических бабочек, которые либо ранее не встречались в Архангельской области, либо были известны по многолетним единичным находкам. Еще в 1906 г. в этом районе обнаружена бабочка-совка *Erebia disa* [23, с. 1370].

Недавно под Архангельском была замечена бабочка Голубая орденская лента *Catocala fraxini*. Экземпляры были собраны ночью в Приморском районе Архангельска. Обнаруженные в Архангельске бабочки были местными, так как яйца были отложены самками в прошлом сезоне. В результате можно сделать вывод, что с потеплением климата в северной части региона обитают более южные виды насекомых [16, с. 138; 17; 18, с. 1699].

Стратегии адаптации арктических видов насекомых

Особое значение имеет выявление роли различных форм адаптационных стратегий в экстремальных условиях Арктики. В результате многолетних наблюдений была предложена концепция преимуществ пассивно-толерантных стратегий по сравнению с активно-резистентными стратегиями [20, с. 1122; 21, с. 438]. Особенности «пассивных» стратегий — медленное, подчиненное тепловым условиям, длительное многолетнее развитие с низкой интенсивностью трофической деятельности, в ряде случаев выраженная детерминированность низ-

кого годового прироста с остановкой со значительным временным и температурным запасом, возможностью повторной зимовки одних и тех же особей или одних и тех же стадий. Они обнаружены у различных видов арктических насекомых — двукрылых, бабочек, жуков-листоедов.

Почему животные не замерзают в Арктике? Животные, в том числе многие насекомые, живут в суровых условиях Арктики и используют физиологический механизм холодовой адаптации, заключающийся в приспособлении к низким температурам двумя способами: либо переносить холод, либо избегать замерзания. Чтобы не переносить холод, большинство насекомых зимой впадают в спячку (диапаузу). На этом этапе их развитие приостанавливается. Кроме того, некоторые насекомые могут реагировать на холод, выделяя жидкость из своего тела. Хотя такие насекомые на некоторое время замерзают, никакого вреда их организму это не причиняет. Они «просыпаются» в конце зимы, когда начинает таять лед [24, с. 338].

Некоторые виды насекомых выделяют специальные соединения. Это, например, природный спирт глицерин, который действует на организм как антифриз. Иными словами, благодаря этим веществам насекомые, живущие в холодных условиях, могут переохлаждаться, но вода в их организме не превращается в лед [25].

Продвижение кровососущих членистоногих на север

В Арктическом регионе наиболее выражено постоянное повышение температуры окружающей среды. При этом увеличение температурных аномалий в полярных регионах в три раза превышает средние темпы глобального потепления. Такая же картина наблюдается в Арктической зоне Российской Федерации [26].

Под влиянием температурных факторов ареалы кровососущих комаров и клещей смещаются дальше на север, в результате чего переносимые ими инфекционные заболевания все чаще появляются в северных и горных районах, где раньше они были практически не распространены, не были зарегистрированы. Эксперты также отмечают, что энцефалитный клещ имеет тенденцию мигрировать на север [27, 28].

Глобальное потепление приводит к перемещению переносчиков различных инфекционных заболеваний в более северные регионы и высокогорные районы и, таким образом, к увеличению риска трансмиссивных инфекционных заболеваний, которые еще не были зарегистрированы в этих районах [28].

Глобальное потепление и его влияние на здоровье населения

Престижный медицинский журнал «Lancet» опубликовал подробный отчет о работе большой международной группы исследователей из 35 научных учреждений по изучению изменения климата и его влияния на здоровье населения [29, с.365; 30, с. 1858]. Прогнозирование последствий продолжающихся изменений климата на передачу инфекционных заболеваний, особенно зоонозов, является сложной задачей из-за отсутствия знаний о распространенности и разнообразии патогенов в этих регионах [31, с. 99; 32, с. 196].

Длительный период высоких температур воздуха, ранняя теплая весна и продолжительная осень являются причинами распространения некоторых видов грызунов-переносчиков, что, в свою очередь, создает условия для развития туляремии, лептоспироза, геморрагических лихорадок с почечным синдромом, псевдотуберкулезом. Данная проблема наиболее актуальна для северных регионов России.

Изменение климата также приводит к разрушению зон вечной мерзлоты. Проблемы изменения этих зон напрямую связаны с очагами природно-очаговых инфекций.

Исследования последних лет показали возможность длительного сохранения жизнеспособных про- и эукариотических микроорганизмов в условиях постоянных отрицательных температур в слоях вечной мерзлоты, возраст которых колеблется от нескольких тысяч до 2–3 млн лет. В ходе масштабных исследований сообществ организмов в вечной мерзлоте были выделены жизнеспособные цисты свободноживущих простейших, находящихся в состоянии криптобиоза в течение десятков и сотен тысяч лет. Это указывает на возможность активации возбудителей инфекционных заболеваний, длительно сохраняющихся в почве, вследствие изменения климата в северных регионах РФ [33]. Возможно, в связи с таянием вечной мерзлоты в скотомогильниках произойдет повторное появление сибирской язвы, представляющей серьезную угрозу для северных регионов РФ.

Район Западной Сибири за Полярным кругом на протяжении многих лет был крайне неблагополучной территорией по заболеванию сибирской язвой, так как здесь располагались многочисленные могильники животных, погибших от этого заболевания. Ярким примером является масштабная эпидемия сибирской язвы в Ямало-Ненецком автономном округе в 2016 г. [34, с. 10]. Заболевания животных возникали у оленей, особенно в теплое время года, когда они соприкасались с зараженной возбудителем почвой. Случаи заболевания сибирской язвой у людей были зарегистрированы также в 1931 и 1941 гг.

Аномалия температуры летом 2016 г., достигавшая в течение суток 29–34°C, привела к увеличению глубины сезонного оттаивания вечной мерзлоты и возможной вегетации микроба сибирской язвы, его перемещению к поверхности земли с межмерзлотными водами. Это привело к крупнейшей эпидемии оленей с момента регистрации случаев сибирской язвы. Очевидна необходимость организации системы микробиологического мониторинга потенциально опасных для человека микроорганизмов в Арктике по мере изменения климата в арктическом макрорегионе [33].

По мере сокращения площади вечной мерзлоты на смену тундре приходит тайга. С эпидемиологической точки зрения это означает возможность расширения ареала ряда грызунов и насекомых, являющихся переносчиками инфекции. Потепление климата влияет на распространенность природно-очаговых заболеваний, изменяет условия существования популяций переносчиков и условия развития в переносчиках возбудителей инфекций. По данным международных исследований, все большее значение в северных регионах Швеции, Норвегии, Финляндии и Российской Федерации приобретают такие климатозависимые инфекционные заболевания, как геморрагическая лихорадка с почечным синдромом, клещевой энцефалит и болезнь Лайма [35, с. 179].

Анализ результатов многолетнего эколого-эпидемиологического надзора за клещевым энцефалитом, проведенного в Европейской субарктике в районах северной границы распространения таежного клеща, позволяет констатировать значительный рост заболеваемости в Архангельской области в 2000–2009 гг. по сравнению с 1980–1989 гг., что вызвано рядом факторов, важнейшим из которых является изменение климата [36]. Аналогичную, хотя и менее выраженную, чем в Архангельской области, тенденцию роста заболеваемости клещевым энцефалитом, можно наблюдать в соседнем регионе — в Республике Коми [34, с. 9]. Исследования сыворотки крови доноров, не привитых и не переболевших клещевым энцефалитом, показали почти четырехкратное увеличение числа лиц с антителами IgG к вирусу клещевого энцефалита за 12-летний период (2001–2013 гг.). Наибольший прирост наблюдался среди доноров из южных регионов, что свидетельствует о перемещении инфицированных клещей с юга на север, а также говорит об адаптации как вируса, так и переносчика к новым климатическим условиям [35, с. 180].

Одним из важных климатических факторов, влияющих на риск инфекционных заболеваний, является качество питьевой воды, на которое в северных регионах влияет таяние льдов, размыв потенциально опасных территорий тальными водами (свалки ТБО, свалки промышленных отходов, бывшего топлива и смазки подшипни-

ков и т.д.). Употребление некачественной питьевой воды приводит к увеличению частоты кишечных инфекций. Ни один арктический регион не входит в перечень регионов Роспотребнадзора с хорошим качеством питьевой воды. Проблема нехватки качественной воды в Арктическом регионе остается актуальной из-за наличия возбудителей инфекционных заболеваний [34, с. 8].

Наиболее уязвимыми к глобальному потеплению являются коренные малые народы севера, которые вынуждены менять свой традиционный образ жизни и рацион питания. Увеличение числа экстремальных погодных явлений, связанных с глобальным потеплением, может привести к транспортным проблемам [37, с. 308]. Использование современных методов математического картографирования Архангельской области в сотрудничестве с географами МГУ позволило выявить пространственную неоднородность в условиях транспортной доступности квалифицированной медицинской помощи. Так, примерно 25 % населения на юге этого района оказались в группе риска с точки зрения невозможности посещения медицинского учреждения, время досягаемости которого находится в пределах от 1 до 1,5 ч, а при наступлении неблагоприятных погодных условий, например зимой, половина всего населения региона может оказаться под угрозой отсутствия помощи. Неблагоприятные погодные условия в Арктике, частота которых увеличивается по мере потепления климата, могут повлиять на поставки продовольствия и других товаров [38, с. 90].

Кроме того, изменение климата ведет к снижению уровня жизни коренных народов, влияя на традиционное природопользование, создавая трудности в рыболовстве и охоте, приводя к изменению миграционных путей диких оленей и изменениям в их кормовой базе, а также к сокращению численности морских животных из-за нарушения их традиционной диеты.

В медицинской литературе имеются данные о частоте заболеваемости представителей определенных этносов по сравнению с некоренным населением. В последние годы медицинское сообщество совместно с экономистами и политиками разработало различные методы снижения потерь, вызванных ростом заболеваемости и преждевременной смертности населения Арктического макрорегиона, учитывая его высокое экономическое и политическое значение для страны [38, с. 90].

Опыт России по защите здоровья населения в условиях аномальной жары

Изменение климата в Российской Арктике характеризуется не только повышением летних температур, но и увеличением частоты волн тепла и удлинением теплого весеннего периода. Волны жары представляют

особый риск для здоровья, поэтому их более внимательно изучают в различных странах мира. Экономический ущерб, причиняемый температурными волнами, оценивается на основе расчетов дополнительной смертности населения трудоспособного возраста, ограничений трудоспособности и инвалидности вследствие осложнений связанных с климатом заболеваний, таких как инсульт [39, с. 133].

Для арктического макрорегиона можно применять как общие рекомендации ВОЗ по оценке готовности различных служб к климатическим рискам, так и чисто арктические рекомендации, учитывая удаленность многих населенных пунктов от основных объектов жизнеобеспечения, размещения жилых домов и технической инфраструктуры в районах с вечной мерзлотой, а также кочевой образ жизни некоторых коренных общин.

Общие индикаторы, которые необходимо отслеживать, включают: усиление системы раннего метеорологического предупреждения о наступлении жары и высоких уровнях загрязнения воздуха и наводнениях, определение числа групп населения, подвергающихся наибольшему риску в конкретных районах, включая людей в возрасте 65 лет и старше, которые подвергаются воздействию загрязнения воздуха и особенно мелкой пыли [34, с. 5].

В России был утвержден Национальный план мероприятий по адаптации к изменению климата до 2025 года [26]. План адаптации Арктического макрорегиона к климатическим рискам должен включать отдельные разделы, посвященные рискам для здоровья, вызванным деградацией вечной мерзлоты в долгосрочной перспективе (до 2050 г.). В связи с ожидаемым ухудшением состояния вечной мерзлоты из-за изменения климата, в Арктическом макрорегионе существует риск разрушения более 20 млн квадратных метров грунта из-за снижения его несущей способности и просадки фундаментов зданий.

Неисправности в технических системах (водоснабжение, канализация) могут стать причиной кишечных инфекций. Другие виды инфекций — сибирская язва, туляремия, клещевой энцефалит и другие также активизируются с потеплением в зависимости от климатических условий, поэтому для каждой из этих инфекций необходимо разрабатывать детальные специфические профилактические мероприятия.

Для предотвращения негативных последствий аномальной жары Росгидромет планирует повысить качество прогнозов погоды на срок до 5 дней, чтобы была возможность заранее подготовиться к последствиям опасной для здоровья жары.

Знание температурных порогов влияния высоких температур на смертность населения Архангельска позволило разработать план действий по снижению последствий этих температурных аномалий. Рекомендации для работников здравоохранения и населения изложены в монографии «Изменение климата и здоровье: оценка, индикаторы, прогнозы» [32, с. 196].

Установлено, что по мере изменения типа климата — от морского до континентального — зимние аномалии температуры увеличиваются, тогда как летние аномалии температуры остаются примерно постоянными [37, с. 305].

Экономические аспекты адаптации к изменению климата

Изменение климата не только увеличивает смертность, связанную с климатом, но также создает системные риски для всего сектора здравоохранения и снижает возможности предоставления всех видов медицинской помощи, как показали недавние катастрофические волны тепла. Тяжелая ситуация со стационарной помощью в Москве, имевшая место во время пандемии COVID-19, аналогична событиям жаркого лета 2010 года, когда возникли серьезные проблемы с чрезмерной нагрузкой на службы скорой помощи, больницы и морги. По этой причине существует необходимость оценить устойчивость и надежность всей системы здравоохранения во время катастрофических волн жары, ураганов, наводнений и эпидемий [38, с. 90].

Ситуация с COVID-19 наглядно показала, насколько мало изучены новые риски для здоровья человека, как со стороны новых и рецидивирующих инфекций, так и со стороны природных очагов различных инфекционных заболеваний в Арктике. В проекте Национального плана адаптации России для Арктического макрорегиона необходимо выделить отдельный раздел по охране здоровья жителей населенных пунктов — городов, поселков, сельских поселений, мест проживания коренных малочисленных народов [33]. Проблема увеличения заболеваемости населения Арктики в условиях потепления требует создания системы надзора за изменением климата и климатозависимыми инфекционными заболеваниями. Результатом должно стать определение мер по совершенствованию эпидемиологического надзора, установление исходных показателей и параметров контроля динамики инфекционных изменений, исследование связи между изменением климата и инфекционными заболеваниями в Арктике, а также разработка программ профилактики инфекционных заболеваний среди населения Арктики и животных.

Антропогенные факторы сокращения биоразнообразия в Арктике

Проблема сокращения биоразнообразия в Арктике стала особенно актуальной в последнее время в связи

с глобальными изменениями, вызванными антропогенным потеплением Арктики. Российские исследователи интенсивно разрабатывают методы реконструкции истории формирования биоты Северной Евразии, а также ее динамики, в частности определения последствий разрушения окружающей среды, химического загрязнения, прогнозирования последствий глобальных изменений климата [40, с. 364].

Одной из наиболее серьезных проблем для сохранения биоразнообразия Арктики являются последствия процесса промышленного освоения недр. Понятно, что это очень важно для нашей страны, но необходимо одновременно развивать систему мониторинга экологической ситуации и предотвращения стихийных бедствий. Последствия норильской катастрофы в мае 2020 г. хорошо известны. Известны и другие аварии в Арктической зоне.

В Арктике все экосистемные процессы, включая деградацию загрязняющих веществ, происходят очень медленно. Любое антропогенное загрязнение в этом регионе приводит к долгосрочному осаждению загрязняющих веществ в водных и наземных водоемах. Если в более южных регионах активно задействована микробная составляющая, то на севере микробная составляющая существенно менее активна из-за температурных условий. Это приводит к тому, что та же нефть оседает и накапливается, и, если она попадет, например, в водные системы, это становится очень большой проблемой, которая повлияет на экосистему на многие годы вперед.

С каждым годом потепление в Арктике влияет на региональные экосистемы и может привести к исчезновению местной флоры и фауны.

Современное состояние ситуации свидетельствует об аномальном потеплении, которое приводит к глобальной перестройке биоты во всех регионах Арктики. Антропогенная деятельность привела к повышению температуры планеты на 1°C., по прогнозам, вскоре это значение может увеличиться еще на 0,5°C, что уже будет критическим значением. Промышленное развитие Арктики ведет к еще большей деградации арктической среды обитания.

В настоящее время воздействие арктических зон на окружающую среду носит глобальный характер, и изменения арктического биоразнообразия продолжают прогрессировать.

Состояние популяций арктической флоры и фауны зависит от изменения климата: потепления, увеличения количества осадков и толщины снежного покрова. Арктические млекопитающие тесно связаны с кормовой базой тундры, а «озеленение» Арктики влияет на харак-

тер хищничества и питания. В последние годы популяции многих видов арктических птиц сократились из-за антропогенного воздействия и изменения климата [41, с. 9].

Загрязнения в Арктической зоне относятся к накопленному экологическому ущербу и могут быть результатом предыдущей экономической и военной деятельности, оставшихся со времен «холодной войны» (заброшенные склады с бочками с горюче-смазочных материалов, остатки разлитого топлива и металлолом). Источниками загрязнений являются материковые стоки из дельт крупных рек, объектов землепользования и стационарных объектов (военных частей, полярных станций) [42, с. 108].

В арктических регионах Российской Федерации обнаружено более 70000 кубометров промышленных отходов. Чтобы устранить загрязнение без ущерба для экосистем, необходимо внедрение новых технологических подходов к решению этой проблемы.

Разливы нефти оказывают наиболее разрушительное воздействие на биоразнообразие. Зона арктического шельфа и ее прибрежные районы наиболее подвержены риску разлива нефти. Проблема осложняется тем, что нефть, окруженная льдом, труднодоступна для бактериального разложения, и часто затруднен доступ к месту разлива нефти [43, с. 129]. Локальные аварии имеют пролонгированный эффект: нефтепродукты глубже проникают в почву и засоляют ее, что затрудняет их обнаружение и очистку.

Загрязнение вод северных морей с каждым годом увеличивается. Низкая температура воды арктических морских экосистем и непродолжительность фотосинтетической деятельности продуцентов отрицательно влияют на биоразнообразие. Загрязнение морской воды происходит за счет сбросов сточных вод и судовых отходов, пищевых и нефтесодержащих отходов, а также загрязнений от судовых дизелей. Подобные экологические проблемы сопровождаются шумовым загрязнением, которое вынуждает морскую фауну покидать места обитания.

Северный Ледовитый океан загрязнен более чем 300 миллиардами частиц микропластика. Микропластик встречается по всей толще воды, во льду и донных отложениях. Концентрации этого загрязнителя в арктических водах уже превышают концентрации в известных мусорных пятнах Тихого океана [44, с. 48].

Рыболовство в Арктике оказывает негативное воздействие на экосистемы. Для сохранения биологического разнообразия важен комплексный подход к решению проблем рациональной добычи морских ресурсов, мониторинга влияния рыболовства на взаимоотношения

между компонентами экосистем в арктических водах и правильного экологического подхода к интенсивности и способу промысла. Вымирание любого вида в результате рыболовства влияет на экосистему всей Арктики. Рыболовство может повлиять на генетическое разнообразие популяций и развитие всех видов рыб [45, с. 85].

Неконтролируемый рыбный промысел существенно подрывает рыбные запасы и изменяет всю экосистему. Рыболовство может оказывать негативное воздействие на состояние дна водоемов. Это воздействие обусловлено взаимодействием рыболовных снастей с почвой и разрушением биогеоценозов шельфовых экосистем, что приводит к масштабным нарушениям верхнего слоя донных отложений и обитающих в них донных сообществ [46, с. 172].

Глобальное сокращение запасов пелагических рыб пагубно влияет на морских млекопитающих и птиц.

Другой проблемой, связанной с потеплением, является **таяние ледников и выбросы парниковых газов** [47, с. 8]. По мере таяния вечной мерзлоты увеличивается выброс парниковых газов в атмосферу, особенно метана и углекислого газа. Данная проблема возникает при бурении и эксплуатации скважин в верхней части криолитосферы из-за высокой газонасыщенности вечномерзлых пород. Дегазация недр Арктической зоны может привести к сильным газовым выбросам со дна термокарстовых озер, образующих подводные кратеры. Выбросы природного и техногенного газа взрывоопасны. Подобные процессы негативно влияют на арктическую биосферу и общее состояние Земли и дают толчок к еще большему усилению глобального потепления.

Состояние арктической зоны вечной мерзлоты напрямую зависит от температуры, повышение которой приводит к таянию ледников. По последним данным, среднегодовая температура в Арктике выросла на 1,4°C, а ледяной покров за последние годы достиг рекордно низкого уровня. Показатели вечной мерзлоты снизились на 13 % по сравнению с 1997 годом, а в Баренцевом море толщина льда уменьшилась на 90 %. Таяние льда может иметь множество негативных последствий для флоры и фауны [47, с. 10].

В результате исследований международной организации Nature Climate Change ученые пришли к выводу, что к 2035 году арктические льды могут полностью растаять. В глобальном масштабе отсутствие дрейфующих льдов повлияет на белых медведей; им станет труднее добывать пропитание, что приведет к голоданию популяции и вынудит их мигрировать в населенные пункты. Ареалы и виды многих представителей арктической флоры и фауны могут полностью исчезнуть и кардинально изменить экосистему арктических зон [30, с. 1877].

Государственная политика России в области экологической безопасности Арктики

Проблема изменения арктического климата с каждым годом становится все более актуальной. Необычное потепление в Арктике влияет на региональные экосистемы и может привести к исчезновению местной флоры и фауны. Поскольку запасы нефти и газа в Арктике привлекают все больше внимания в разных странах, велика вероятность того, что развитие арктической зоны станет направлением основной государственной политики арктических стран и, следовательно, развитие арктического потенциала войдет в основы государственной политики России в области природных ресурсов [48, с. 196].

Освоение Арктики играет глобальную роль в задачах экономического развития и национальной безопасности Российской Федерации. За последние 10 лет создана нормативная база развития региона и реализован ряд крупных проектов. Принята Стратегия развития и национальной безопасности Арктической зоны Российской Федерации на период с октября 2020 по 2035 гг.

Россия также участвует в ряде международных соглашений и инициатив Арктического совета, а также соглашений, регулирующих судоходство, рыболовство и охрану окружающей среды в Арктике.

Целями глобального сотрудничества являются продвижение нового режима международного судоходства в Арктике, добыча и распространение технологий российского производства, а также доступ к финансированию международных институтов развития неарктических стран, заинтересованных в арктических проектах.

Заключение

Арктическая зона Российской Федерации располагает огромными запасами нефти и газа, доказанными запасами золота, серебра, алмазов, редких металлов, медных и никелевых руд, марганца. Арктический шельф хранит около 70 % нефти и до 90 % ресурсов газа всех морских акваторий России.

Изменение климата поменяло привычные маршруты воздушных масс и принесло с собой большое количество теплого южного воздуха. Из-за таяния вечной мерзлоты и выделения метана усиливается парниковый эффект. Россия теряет свои арктические территории из-за таяния ледников и береговой эрозии. Ежегодные исследования показали отступление берега в арктической зоне на 2–4 метра. Это влияет как на экономическую, так

и на экологическую ситуацию в арктической зоне Арктике и наносит непоправимый ущерб арктической биосфере. Около 25 % населенных районов могут стать непригодными для проживания.

Из-за быстрого изменения климата усиливается деградация экосистем в арктической зоне, а также увеличивается продуктивность растительности, что приводит к «озеленению» Арктики. Подобные процессы оказывают негативное влияние на среду обитания арктической флоры и фауны многих видов. Эти процессы дестабилизируют естественное функционирование арктических экосистем [43, ис. 126].

За последние 10 лет создана нормативная база развития Арктического региона и реализован ряд крупных проектов. Принята Стратегия развития и национальной безопасности Арктической зоны Российской Федерации на 2020–2035 годы. Россия участвует в ряде международных соглашений и инициатив Арктического совета, а также соглашений, регулирующих судоходство и рыболовство и защиту окружающей среды.

Очистка Арктики от токсичных отходов — это важнейшее направление экологической безопасности в Арктике. Операции по очистке проводятся с использованием экологически чистых, высокоэффективных инновационных технологий, которые должны стать основой развития Арктики.

В настоящее время необходимо совершенствовать сеть заповедных территорий и создавать новые заповедники различного профиля не только на суше, но и на море, создавать новые заповедники на Новой Земле, Вайгаче, в Большеземельской тундре, на Ямале, Чукотке [49, с. 12].

Кроме того, необходимо приступить к организации охраняемых акваторий, особенно в Баренцевом и Карском морях. В акватории Баренцева моря должна быть создана система морских охраняемых территорий, обеспечивающих безопасные места нереста промысловых рыб, места линьки и отдыха тюленей и т.д., со строго контролируемой хозяйственной деятельностью и ограниченным использованием биологических ресурсов.

Поскольку запасы нефти и газа привлекают все больше и больше внимания в различных странах, развитие арктических регионов, вероятно, станет основным направлением государственной политики многих стран мира.

ЛИТЕРАТУРА

1. Русская Арктика. Введение в общую географию / А.Н. Чилингаров, В.М. Грузинов, Ю.Ф. Сычев. // Москва, 2014, 336–343
2. Направления, состояние и перспективы отечественных исследований биологического разнообразия Арктики / Чернов Ю.И. // Вестник РФФИ, 2004, №1, 1–26
3. Портал «Научная Россия» (<https://scientificrussia.ru/>)
4. Кольский научный центр Российской Академии наук: исторические вехи и перспективы / Кривовичев С.В. // Горн. ж. 2020, №9, 5–8
5. Биота Арктики: таксономическое разнообразие / Чернов Ю.И. // Зоол. ж., 2002. 81, № 12, с. 1411–1431
6. Экологическая целостность надвидовых таксонов и биота Арктики / Чернов Ю.И. // Зоол. ж., 2008. 87, № 10, 1155–1167
7. Изменения состава фауны двукрылых (Diptera) в пределах Арктики / Городков К.Б. // Место и роль двукрылых насекомых в экосистемах: Сборник научных трудов 6-го Всероссийского симпозиума диптерологов, посвященного 100-летию со дня рождения А.А. Штакельберга, Санкт-Петербург, 21–25 апр., 1997. СПб. 1997, 41–42
8. Типулоидные двукрылые в тундровой зоне / Ланцов В.Н., Ю.И. Чернов // Ин-т эволюц. морфологии и экологии животных им. А.Н. Северцова, 1987, Москва, Наука, 21 с.
9. Коллемболы Арктики: Структура фауны и особенности хорологии / Бабенко А.Б. // диссертация доктора биологических наук. Москва, 2005, 382 с.
10. Особенности жизненных циклов жуков (Coleoptera, Carabidae) в условиях северной тайги / Шарова И.Х., Филиппов Б.Ю. // Зоол. ж., 2003, 82, № 2, 229–238
11. Жуки (Coleoptera) в полярных пустынях Северной Земли / Макарова О.Л. и др. // Зоол. ж., 2007, 86, №11, 1303–1324
12. Коллекции Зоологического института РАН — сокровище мировой науки / Алимов А.Ф., Танасийчук В.Н., Степаньянц С.Д. // Вестник российской академии наук, 2000, 70, № 1, 63–72
13. Species status of *Bombus monticola* Smith (Hymenoptera: Apidae) supported by DNA barcoding / Gjershaug J.O. et al. // Zootaxa, 2013, 3716, 3, 431–440.
14. Жуки (Coleoptera) в полярных пустынях Северной Земли / Макарова О.Л. и др. // Зоол. ж., 2007, 86, №11, 1303–1324
15. Отряд жесткокрылые (Insecta, Coleoptera) в фауне Арктики. Сообщение 1. Состав фауны / Чернов Ю.И. и др. // 93, №1, 7–44
16. Короед-типограф и усыхание еловых лесов / Маслов А. Д. // М.: ВНИИЛМ, 2010, 138 с.
17. Влияние современного изменения климата на биологическое разнообразие / Кузнецов В.П. // Нижневартковский госуниверситет. 2021. Научно-методический вебинар, 2021
18. The last refugia for a polar relict pollinator: isolates of *Bombus glacialis* on Novaya Zemlya and Wrangel Island indicate its broader former range in the Pleistocene / Potapov G.S. et al. // Polar Biology, 2021, 44, 1691–1709
19. Состав и пути формирования фауны архипелага Новая земля (на примере модельных групп): комплексный анализ с применением молекулярно-генетических методов. / Спицын В.М. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биол. наук, Архангельск, 2022
20. Phylogeography and ecology of bumble bees on Kolguev / Potapov G.S. // ZooKeys, 2022, 1122
21. Species status of *Bombus monticola* Smith (Hymenoptera: Apidae) supported by DNA barcoding / Gjershaug J.O. et al. // Zootaxa, 2013, 3716 (3), 431–440
22. The first record of *Boloria frigga* (Lepidoptera: Nymphalidae) on Kolguev Island, Arctic Russia / Potapov G.S., Spitsyna E.A., Spitsyn V.M. // Travaux du Muséum National d'Histoire Naturelle. 2021, Grigore Antipa, 64, 2, 103–108. <https://doi.org/10.3897/travaux.64.e65131>
23. Fauna and ecology of butterflies (Lepidoptera, Rhopalocera) from Kanin Peninsula and Kolguev Island / Bolotov I.N. // Zoologicheskii Zhurnal, 2011, 90, 11, 1365–1373
24. Moths and butterflies (Insecta: Lepidoptera) of the Russian Arctic islands in the Barents Sea / Kullberg J. et al. // Polar Biology, 2019, 42, 2, 335–346. <https://doi.org/10.1007/s00300-018-2425-z>
25. Chilled, starved, or frozen: insect mitochondrial adaptation to overcome the cold. // Curr Opin Insect Sci. 2023 58: doi: 10.1016/j.cois.2023.101076
26. Национальный план второго этапа адаптации к изменению климата до 2025 г. Распоряжение Правительство Российской Федерации от 11 марта 2023 г. № 559-р Москва. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202303130019?index=3>
27. Impact of climate change on the expansion of *Ixodes persulcatus* habitat and on the incident tick-borne encephalitis in the north of European Russia / Tokarevich N.K. et al. // Global Health Action Plan. 2011, 4
28. Impact of air temperature variation on the ixodid tick's habitat and tick-borne encephalitis incidence in the Russian Arctic / Tokarevich N.K. et al. // International J. of Circumpolar Health. 2017, Doi org/10.1080/22423982.2017.1298882r
29. Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. / Gasparrini A. et al. // Lancet Planet Health. 2017, 1, 360–367
30. The 2019 report of the Lancet Countdown on health and climate change: ensuring that the health of a child born today is not defined by a changing climate // The Lancet Planet Health. 2019, 394, № 316. 1836–1878
31. Workers' health and productivity under occupational heat strain: a systematic review and meta-analysis / Flouris A.D., et al. // Lancet Planet Health. 2018, 2, 521–31
32. Изменение климата и здоровье: оценка, индикаторы, прогнозы / Ревич Б.А., Малеев В.В., Смирнова М.Д. // М.: ИМП РАН, 2019, 196 с.
33. Риски здоровья населения при изменении климата арктического макрорегиона DOI: 10.47711/2076–318-2020-395-408
34. Изменение климата в России — проблема общественного здоровья / Ревич Б.А. 2021, 1(4), 5–14. DOI: 21045/2782–1676-2021-1-4-5–14
35. Российский и международный опыт разработки планов действий по защите здоровья населения от климатических рисков / Ревич Б.А. и др. // Гигиена и санитария, 2020, 99, № 2, 176–181
36. Стратегия адаптации к воздействию изменения климата на здоровье населения для Архангельской области и Ненецкого автономного округа Российской Федерации / Сидоров П.И. и др. // Архангельск, 2012

37. Здоровье населения при изменении климата Арктического макрорегиона // Проблемы сохранения здоровья и обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Арктике / Материалы II международной научно-практической конференции, 2019, 303–310
38. Оценка уязвимости и способности адаптации здоровья к изменению климата в Архангельской области и Ненецком автономном округе Российской Федерации / Балаева Т.В. и др. // Тверь: Триада, 2012. 90 с.
39. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия в Российской Федерации» по Республике Коми в 2016 году». // Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Республике Коми. Сыктывкар: 2017, 133 с.
40. Катастрофический выброс газа в 2020 г. на полуострове Ямал в Арктике. Результаты комплексного анализа данных аэрокосмического зондирования / Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н. // Арктика: экология и экономика, 2021, 11, № 3, 362–374
41. Актуальные проблемы предотвращения, ликвидации разливов нефти в Арктике и методы оценки экологического ущерба прибрежным территориям / Павленко В.И. и др. // Арктика: экология и экономика, 2015, №3 (19), 4–11
42. Оценка угроз морской экосистеме Арктики, связанных с промышленным рыболовством, на примере Баренцева моря / Боханов Д.В. и др. // Всемирный фонд дикой природы (WWF), М., 2013, 108 с.
43. Антропогенное воздействие на биоразнообразие Арктики / Губенок Е.С., Радионенко В.Н. // Современное состояние и проблемы загрязнения экосистем. Всероссийская научно-практическая конференция «Биоразнообразие, состояние и динамика природных и антропогенных экосистем России», 2022, Комсомольск-на-Амуре, 125–132
44. Антропогенная трансформация арктических экосистем России: подходы, методы, оценки. / Тишков А.А. и др. // Арктика: экология и экономика. 2019, №4, 38–51
45. Биотически значимые тренды климата и динамика биоты российской Арктики / Тишков А.А. и др. // Арктика: экология и экономика, 2019, №1, 71–87
46. Исследование загрязнения микропластиком морей российской Арктики и Дальнего Востока / Ершова А.А. и др. // Арктика: экология и экономика, 2021, 11, № 2, 164–177
47. Арктика и глобальное потепление: адаптация к изменению климата и охрана окружающей среды / Куделькин Н.С. // Юридические исследования, 2022, № 1, 1–16. DOI: 10.25136/2409-7136.2022.1.37049 URL:
48. Изменение климата и здоровье: оценка, индикаторы, прогнозы // Ревич Б.А., Малеев В.В., Смирнова М.Д. // М.: ИНП РАН, 2019, 196 с.
49. Региональные эффекты изменений климата и ООПТ Арктической зоны Российской Федерации / Белоновская Е.А., Титова С.В., Тишков А.А. // Международный симпозиум «Территориальная охрана природы: от теории к практике»: 8 Международная конференция «Географические основы формирования экологических сетей в Северной Евразии», 2020, Апатиты, 14–19 сент., 2020, 12–14

© Барыбкина Мария Николаевна (kved@list.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕКРЕАЦИОННЫХ ПРОБЛЕМ ТЕРРИТОРИИ НА ОСНОВЕ ПОЧВЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ АНАЛИЗОВ НА ПРИМЕРЕ ЛОД РГАУ МСХА ИМ. К.А. ТИМИРЯЗЕВА

THE USE OF INFORMATION
TECHNOLOGIES TO ASSESS
RECREATIONAL PROBLEMS
OF THE TERRITORY ON THE BASIS
OF SOIL AND ECOLOGICAL ANALYSES
ON THE EXAMPLE OF THE LOD RGAU
OF THE MINISTRY OF AGRICULTURE
NAMED AFTER K.A. TIMIRYAEV

**A. Bezrukih
E. Bezrukikh
N. Sizonova
L. Mosina**

Summary. The article is devoted to the development of a theoretical and methodological basis for an information platform for integrated monitoring of the ecological state of a forest experimental cottage. Architectural solutions combining methods of geographic information systems (GIS), remote sensing and web technologies are considered. Special attention is paid to the modular approach, which includes the collection of heterogeneous data (soil, geomorphological, biological), their spatial processing and interactive visualization. Algorithms for estimating anthropogenic load, such as mapping recreational digression and predicting the dynamics of heavy metal pollution using geoinformation technology methods, are analyzed. The advantages of integrating open-source tools (QGIS) and cloud technologies to increase the flexibility and scalability of the system are substantiated. The results of the work form the basis for the creation of adaptive environmental monitoring platforms capable of optimizing the management of natural resources.

Keywords: environmental monitoring, geoinformation systems, web platform, anthropogenic load, machine learning, forest ecosystems.

Безруких Алексей Игоревич

аспирант, ФГБОУ ВО Российский государственный
аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева
abezrukih@list.ru

Безруких Евгений Игоревич

техник 1-ой категории, ФГБУ ВНИИПО МЧС России
genbezrukih@gmail.com

Сизонова Наталья Александровна

научный сотрудник, ФГБУ Всероссийский
Научно-Исследовательский Институт
Противопожарной Обороны МЧС России
Nat-sizonova@yandex.ru

Мосина Людмила Владимировна

доктор биологических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный
университет — МСХА имени К.А. Тимирязева»
abezrukih@list.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке теоретико-методологической основы информационной платформы для комплексного мониторинга экологического состояния лесной опытной дачи. Рассмотрены архитектурные решения, объединяющие методы геоинформационных систем (GIS), дистанционного зондирования и веб-технологий. Особое внимание уделено модульному подходу, включающему сбор гетерогенных данных (почвенные, геоморфологические, биологические), их пространственную обработку и интерактивную визуализацию. Проанализированы алгоритмы оценки антропогенной нагрузки, такие как картирование рекреационной дигрессии и прогнозирование динамики загрязнения тяжелыми металлами с использованием методов геоинформационных технологий. Обоснованы преимущества интеграции open-source инструментов (QGIS) и облачных технологий для повышения гибкости и масштабируемости системы. Результаты работы формируют основу для создания адаптивных платформ экологического мониторинга, способных оптимизировать управление природными ресурсами в условиях урбанизированных ландшафтов.

Ключевые слова: экологический мониторинг, геоинформационные системы, веб-платформа, антропогенная нагрузка, машинное обучение, лесные экосистемы.

Введение

Лесная опытная дача, выполняющая функции природной лаборатории, играет ключевую роль в изучении антропогенного воздействия на экосистемы. Территория лесной опытной дачи (ЛОД) РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, расположенная в северной части Москвы, представляет собой уникальный объект, где со-

четаются природные ландшафты и интенсивная рекреационная нагрузка. [10] За последние два десятилетия антропогенное давление на ЛОД привело к фрагментации лесного покрова и снижению биоразнообразия. Эти процессы требуют внедрения систем оперативного мониторинга, способных интегрировать данные о состоянии почв, растительности и рельефа.

Современные исследования в области экологического мониторинга демонстрируют растущий интерес к использованию геоинформационных систем (ГИС) и веб-технологий. Многие исследования подчёркивают эффективность GIS-платформ для анализа пространственной неоднородности загрязнения почв тяжёлыми металлами в урбанизированных ландшафтах. [5] Однако, большинство существующих решений ориентировано на глобальные масштабы, тогда как локальные системы для конкретных природных объектов, таких как ЛОД, остаются недостаточно разработанными.

Важным аспектом является интеграция данных дистанционного зондирования и наземных измерений. На территории объекта за долгие годы его существования накоплена большая база данных в исследуемой области. Тем не менее, для территорий с высокой рекреационной нагрузкой, характерной для ЛОД, сохраняется проблема интерпретации микромасштабных изменений, что требует разработки специализированных алгоритмов.

Цель исследования

Разработка комплексной методики оценки антропогенного воздействия на экосистему Лесной опытной дачи (ЛОД) РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева на основе анализа динамики загрязнения почв тяжёлыми металлами, рекреационного уплотнения почвенного покрова и применения геоинформационных технологий (ГИС) для создания цифровой платформы мониторинга и управления экологическими рисками. [9]

Задачи исследования

- Анализ сведений об объекте (история, особенности, почвы, флора, рельеф)
- Занесение данных на платформу
- Анализ существующих исследований
- Использование ГИС систем для цифровизации данных
- Выводы о текущем состоянии объекта на основе представленной информации

Научная новизна: данное исследование может использоваться в качестве основы для создания цифровой базы данных исследований уплотнения почвы в результате нерегулируемой рекреации и загрязнения тяжёлыми металлами.

Новым перспективным направлением изучения ландшафтных ресурсов туризма в регионе является исследование восприятия человеком ландшафтной среды как фактора формирования мотиваций и предпочтений в выборе туристских дестинаций, а также создания, развития и трансформации функциональной и про-

странственной структуры туристской деятельности. [4] В дальнейшем развитии нуждаются теория и методика создания специальных карт геопространственных образцов территории и информационно-имиджологической ценности ландшафтов в целях туризма.

Материалы и методы

Объект исследования

Исследование проводилось на территории Лесной опытной дачи (ЛОД) РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева — старейшего научного учреждения в области лесоводства. В 1940 году ЛОД постановлением Совета народных комиссаров СССР (№2442 от 3 декабря) была объявлена заповедником. В 1950 году постановлением Совета Министров (№2754 от 30 мая) ЛОД вторично объявили заповедником. В 2003 году ЛОД включена в состав Петровско-Разумовского заказника, получив статус особо охраняемой природной территории, согласно «Федеральному закону об ООПТ» г. Москва. Статус заказника отменён решением Московского городского суда от 25 ноября 2009 года, подтверждённым определением Верховного Суда РФ от 24 марта 2010 г. По делу N 5-Г10-11.

История объекта. Лесная опытная дача имеет давнюю историю. Она является старейшим в России научным учреждением в области лесоводства. В разные годы менялся как статус территории, так и направления её использования. В текущий момент территория является крупнейшей научно-исследовательской лабораторией под открытым небом на территории Европы. За долгие годы было накоплено множество различных результатов исследований. В первую очередь необходимо отметить множество сложных почвенных процессов, а также различные процессы в составе древостоя.

Сразу необходимо отметить важную особенность объекта — его открытость, как для научных исследований, так и для посещения. Данный момент имеет свои положительные моменты, однако стоит рассмотреть и отрицательные стороны данного вопроса. В результате высокого количества посетителей, а также нерационального распределения рекреационной нагрузки — возможно отрицательное воздействие на территорию: вытаптывание, уничтожение подроста.

Методы сбора данных

Почвенный анализ: Отбор проб на 11 контрольных точках с определением физико-химических свойств (плотность почвы, содержание гумуса, тяжёлые металлы). Территория расположена в южной части дерново-подзолистей зоны и представлен дерново-подзолистыми почвами, образующими три группы: дерново-средне-подзолистые на моренном суглинке, дерново-слабо-

и среднеподзолистые на песке и супеси, дерново-средне- и сильноподзолистые глееватые (слабо и средне) почвы на суглинке. Также отмечаются серьезные колебания наблюдаются в плотности иллювиального горизонта (местами очень высокая плотность). [12]

На основе изучения 140 пробных площадей достоверно установлено, что в почвах ЛОД МСХА в настоящее время процесс гумусообразования более активен в парцеллах с листовыми древесными породами.

Геоботанические исследования: Оценка видового состава травянистого покрова и древостоя. Можно выделить изменения в составе насаждений за 100-летний период. Ранее (в особенности к 1915 году — 86 %) на объекте преобладали хвойные породы. Только при таксации в 1962 году площадь насаждений практически сравнялась (49 % листовых). Это связано с засухами 1938 и 1939 года и усыханием ели соответственно. В результате данной особенности возможно изменение в динамике растительности по годам. Кроме того, со временем увеличивалась площадь распространения лиственных. Она проявила себя высокоустойчивым и продуктивным видом. Если же говорить о других видах растений, кроме древесных, то на территории встречается более 80 видов цветковых и около 12 видов мхов. Наблюдается сильное варьирование возрастного состава и пород травянистого покрова. Большое количество луговых, злаковых растений (душистый колосок, луговик и т.д.), что способствует быстрому зарастанию лесосек после срубки.

Мониторинг рекреационной нагрузки: Учет посещаемости, картографирование зон вытаптывания и уплотнения почвы. [2]

Статистическая обработка: Сравнительный анализ данных за 2002 и 2014 годы с расчетом динамики загрязнения Pb (процентное изменение, погрешности).

ГИС-технологии: Создание интерактивных карт в qGIS: пространственное распределение Pb, зоны уплотнения, пробные площади. Визуализация гипсометрических и антропогенных факторов с использованием слоев рельефа, дорожной сети и растительного покрова. Рельеф территории волнистый, холмистый, реже слабоволнистый. Перепад высот от 160 до 175 метров. [14]

Упорядочивание результатов

Результаты структурированы по следующим направлениям:

Динамика загрязнения: Табличное представление изменения содержания Pb (1990–2014 гг.) с акцентом на участках с превышением ПДК.

Пространственный анализ: Серия карт (qGIS), отражающих зоны максимального уплотнения и загрязнения.

Данный подход обеспечивает комплексную оценку экологического состояния ЛОД и формирует основу для цифровой базы данных, применимой в управлении рекреационными ресурсами.

Результаты и их обсуждения

Результат исследования представляет собой базу данных по анализу тяжелых металлов в разные годы и оценку дорожно-тропиночной сети, представленные на цифровой платформе.

На территории выбраны 6 контрольных точек, представляющие собой парные территории с естественной и повышенной рекреационной нагрузкой (рисунок 1). Точки 6, 11 — дубы, возрастом около 120 лет. Точки 8, 7 — дубы, возрастом около 80 лет. Точки 9 и 10 — места произрастания сосны с березой. Данный подход позволяет наиболее подробно оценить корреляцию растительности и рекреационной нагрузки.

Для лучшего понимания особенностей территории были составлены карты-схемы на основе известных существующих данных. [15] На первой схеме представлены существующие пробные площади на всей территории объекта, вторая — показатель накопления свинца в почве (согласно прошлым исследованиям). Третья — указывает на участки уплотнения. Данные схеме были составлены с помощью геоинформационной платформы qGIS (рисунок 2).

В ходе исследования были выявлены случаи превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) тяжелых металлов в почве на отдельных участках, что связано с высокой рекреационной нагрузкой и значительным уплотнением почвы. Эти факторы негативно влияют на качество почвенного покрова, потенциально угрожают экосистеме и могут представлять опасность для здоровья человека. Необходимы рекомендации по управлению рекреационными нагрузками и мероприятия по восстановлению почвенных свойств для снижения риска загрязнения. [17]

Исходя из представленных данных можно наблюдать повышение количества свинца на территории объекта с течением времени. Это касается всех контрольных точек. Повышается как валовое содержание свинца, так и его подвижных форм.

После проведения анализа данных за 1990 и 2014 год была составлена сравнительная таблица загрязнения почв тяжелыми металлами на контрольных точках объекта исследования на примере свинца (Pb). [13]

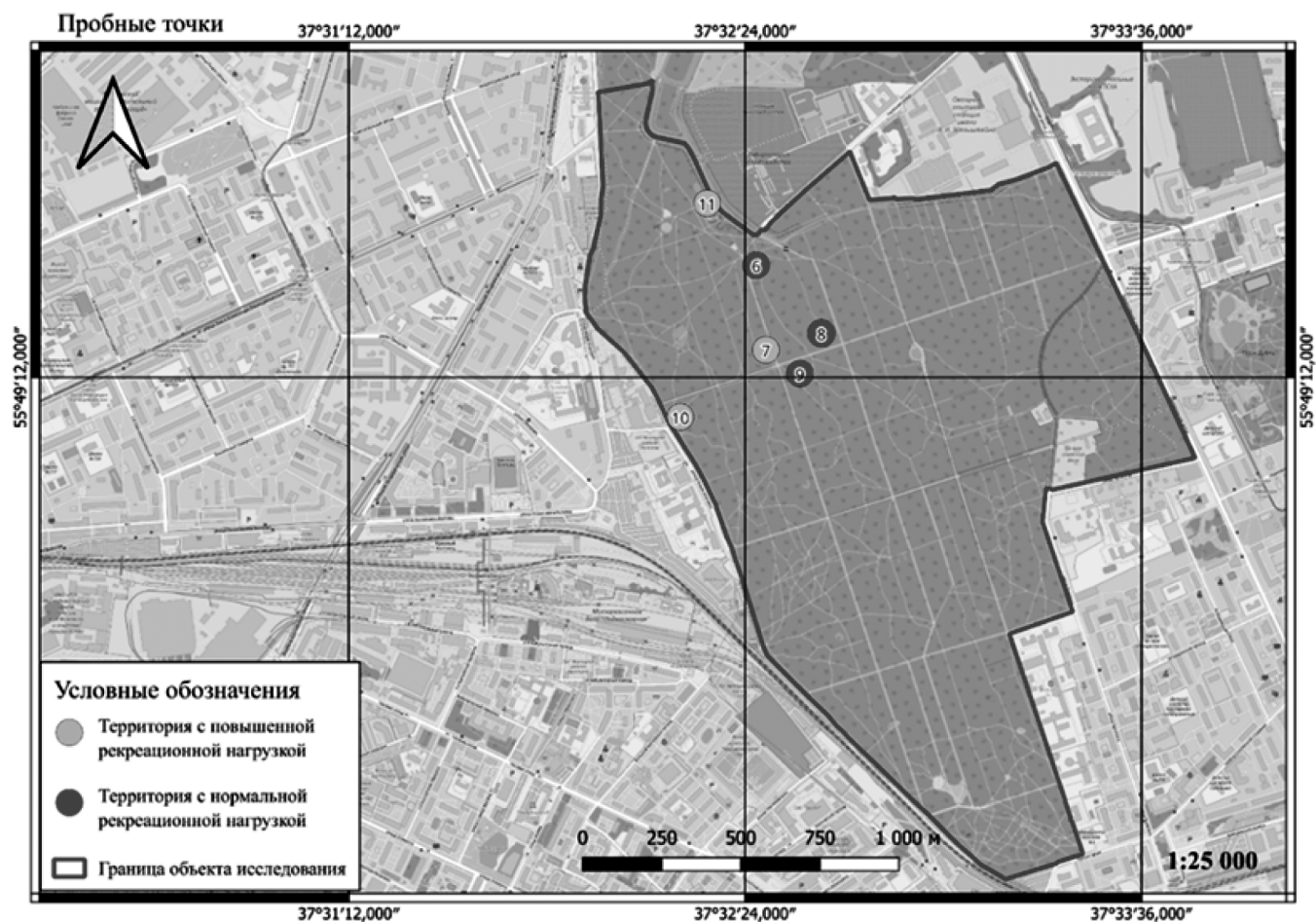


Рис. 1. Пробные точки ЛОД

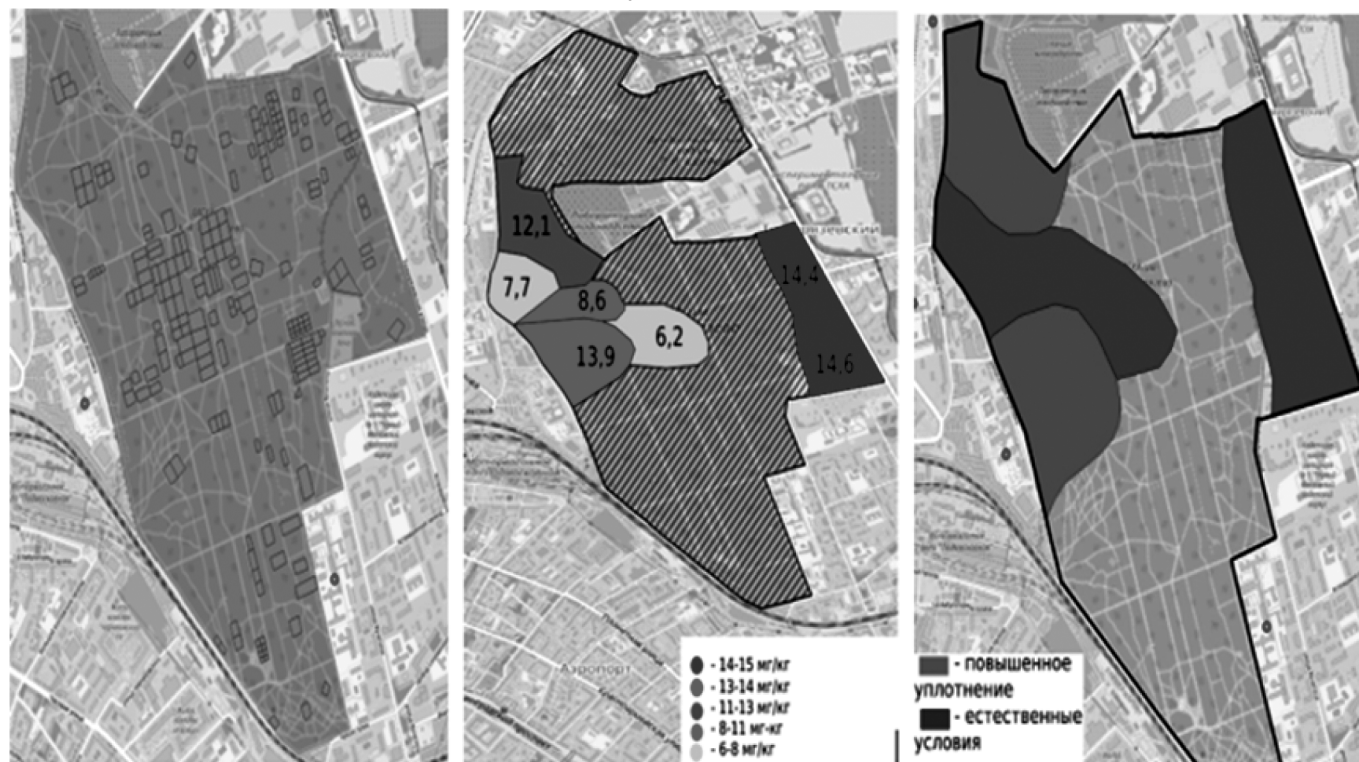


Рис. 2. Карты схемы известных данных по территории

Таблица 2.

Сравнительная характеристика загрязнения почв свинцом на территории объекта тяжелыми металлами за 2002 и 2014 год

Свинец, Pb, мг/кг							
№ пробных площ.	Главная порода, класс возраста насаждений	Валовое содержание		% возрастания, вал.ф.	ПД формы		% возрастания, подв.ф.
		2002	2014		1990	2014	
Участки леса с нормальной антропогенной нагрузкой							
6	Дуб, X–XII	62,2±4,12	68,4±4,8	9,1	9,4±0,8	15,9±0,75	40,9
8	Дуб, VII–VIII	120,01±10,4	146,4±11,4	18	10,4±0,9	24,8±1,25	58,1
9	Сосна с берёзой, IX–XI	86,12±8,15	102,2±8,38	15,7	6,5±0,5	20,5±1,26	68,3
Участки леса с повышенной антропогенной нагрузкой							
11	Дуб, X–XII	114,0±8,04	139,2±10,65	18,1	8,1±0,7	28,2±1,9	71,3
7	Дуб, VII–VIII	77,04±7,85	98,0±7,78	21,4	10,3±0,9	13,8±0,9	25,4
10	Сосна с берёзой, IX–XI	139,0±10,41	168,1±13,81	17,3	9,4±0,8	9,4±0,8	68,5

Анализ представленных данных демонстрирует устойчивую тенденцию к увеличению содержания свинца в почвах Лесной опытной дачи (ЛОД) за 24-летний период. Во всех контрольных точках наблюдается рост как валового содержания Pb, так и его подвижных форм, что свидетельствует о накоплении загрязнения и повышении экологических рисков.

1. Динамика валового содержания свинца:

- Наиболее значительный прирост зафиксирован на участке 8: с 120,01 мг/кг (1990) до 146,4 мг/кг (2014), что соответствует увеличению на 18 %.
- Участок 10 показывает рост с 139,0 мг/кг до 168,1 мг/кг (+17,3 %), что близко к удвоению ПДК (при норме 30–80 мг/кг в зависимости от категории земель).
- Даже на участках с изначально низкими значениями (например, точка 6: с 62,2 до 68,4 мг/кг) отмечается стабильный прирост (+9,1 %).

2. Подвижные формы свинца:

- Концентрация подвижных форм, представляющих наибольшую опасность для экосистемы, выросла в 1,5–2 раза. Например, на участке 6 показатель увеличился с 9,4 до 15,9 мг/кг (+68,5 %), а на участке 11 — с 8,1 до 28,2 мг/кг (+71,3 %).
- Это указывает на усиление мобильности свинца, вероятно, связанное с изменением кислотности почвы, деградацией органического вещества или антропогенным воздействием.

3. Превышение ПДК:

- К 2014 году все участки с повышенной рекреационной нагрузкой (точки 7, 8, 10, 11) демонстрируют превышение ПДК по валовому содержанию Pb в 1,5–2 раза.

- Подвижные формы на этих же участках превышают допустимые уровни в 3–5 раз, что создает угрозу для растительности, грунтовых вод и здоровья посетителей.

4. Причины и последствия:

- Рост загрязнения коррелирует с увеличением рекреационной нагрузки (вытаптывание, транспорт) и климатическими факторами (осадки, температура), усиливающими миграцию металлов.
- Накопление свинца в почве приводит к угнетению почвенной микрофлоры, накоплению токсинов в растениях и риску попадания металла в пищевые цепи.

Таким образом, данные подтверждают критическую необходимость регулирования антропогенной нагрузки на ЛОД и разработки стратегий восстановления почвенного покрова. [7]

Дорожно-тропиночная сеть. Также стоит отметить некоторые особенности ДТС. В связи с тем, что большая часть лесной зоны является рукотворной, на территории прослеживается чёткая сеть межквартальных просек. Кроме того, до текущего времени сохранилось некоторое количество исторически сохранившихся дорог. Из них можно выделить дорогу, некогда соединявшую село Астрадамово и деревню Коптево и дорогу в село Всехсвятское (метро Сокол). Особенности дорожно-тропиночной сети необходимо учитывать для грамотного распределения рекреационной нагрузки по территории и уплотнения почв.

Лесопарк «Лесная опытная дача» почти со всех сторон окружён элементами городской инфраструктуры: около 85 % его границ примыкают к урбанизированным

территориям. Север и северо-запад обрамлены опытными полями и питомниками Тимирязевской академии, восточную часть окаймляет оживлённая Тимирязевская улица. С юга и юго-востока к лесопарку прилегает улица Вучетича с плотной жилой застройкой, а западная граница проходит вдоль железнодорожных путей Рижского направления, включая платформу «Гражданская», промышленные зоны и современные многоэтажные комплексы [8].

Несмотря на ключевую роль в экологическом балансе мегаполиса, текущее состояние древесно-травянистых сообществ (ДТС) лесопарка вызывает беспокойство. Эти территории критически важны для стабилизации городской среды: ежегодно их древостой вырабатывает около 2,5 тыс. тонн кислорода, поглощает до 3 тыс. тонн углекислого газа и удерживает 135 тонн пыли. Кроме того, растительность обладает выраженными антимикробными свойствами, выделяя за вегетационный период порядка 130 тонн фитонцидов — летучих веществ, очищающих воздух. Сохранение и восстановление Лесной опытной дачи необходимо для поддержания экологического здоровья урбанизированного пространства. [11]

Плотность сети дорожно-тропиночных структур (ДТС) служит важным индикатором рекреационной нагрузки

на лесные территории. Чем выше густота троп, тем сильнее участок подвержен антропогенному воздействию. Для анализа используются не только официальные дороги и просеки, но и стихийные тропы, формируемые посетителями — именно они отражают реальные маршруты движения.

Ключевым критерием оценки деградации становится количество временных троп и их состояние. Например, отсутствие растительного покрова на таких тропинках указывает на интенсивное использование территории. Чем больше оголённых участков, тем выше уровень рекреационного давления, что требует своевременных мер для восстановления экологического баланса лесного массива (рисунок 3).

Различия между планируемой дорожно-тропиночной сетью и реальными маршрутами могут быть связаны с естественным стремлением людей сократить путь, обойти препятствия (например, лужи, заросли) или следовать к неучтённым объектам интереса (поляны, виды). На фото, где зафиксированы официальные маршруты, вероятно, видны чёткие, благоустроенные тропы, а на снимке стихийных путей — сеть узких, разветвлённых тропинок с вытоптанной растительностью. Это отражает конфликт между формальным зонированием и поведен-



Рис. 3. Сравнение реально существующих маршрутов на территории ЛОД и сформированных посетителями маршрутами [1]

ческими паттернами посетителей, ведущий к деградации участков с высокой проходимостью.

Основные данные работы были опубликованы на сайте в качестве основы для геоинформационной платформы. Разработка сайта включала в себя создание интерактивной карты, на которой будут представлены следующие данные:

- Уплотнение почвы, выявляемое с помощью геофизических методов.
- Загрязнение тяжелыми металлами, таким как свинец, измеряемое в пробах почвы.
- Рельеф почвы, предоставляемый на основе данных о высоте местности.
- Растительный и почвенный состав, которые помогут определить биоразнообразие и сохранить экосистему.
- QGIS — для создания картографических слоев и анализа геопространственных данных.
- Web-GIS технологии — для размещения карты на веб-платформе.
- PHP и JavaScript — для разработки интерактивных элементов сайта.

Разработка геоинформационной платформы для комплексного экологического мониторинга лесной опытной дачи представляет собой инновационный подход к решению актуальных задач современной экологии и природопользования [3]. Создаваемая система мониторинга обеспечивает реализацию нескольких взаимосвязанных функций:

Научно-исследовательская составляющая:

- Многопараметрический анализ экосистемных процессов
- Количественная оценка антропогенной нагрузки
- Пространственно-временной анализ динамики экосистем

- Диагностика изменений почвенного покрова и фитоценозов

Образовательная функция:

- Создание интерактивной базы данных для профессиональной подготовки экологов
- Визуализация экологических процессов для учебных целей
- Интеграция актуальных исследовательских данных в образовательный процесс

Прикладное значение:

- Научно обоснованное принятие управленческих решений
- Оптимизация природоохранных мероприятий
- Реализация принципов устойчивого природопользования
- Прогнозирование экологических рисков

Методология сочетает ГИС-технологии, дистанционное зондирование и полевые исследования, обеспечивая точность и оперативность мониторинга. Платформа интегрирует науку и практику для устойчивого управления природными ресурсами [6].

Заключение

Проведенное исследование позволило комплексно оценить антропогенное воздействие на экосистему Лесной опытной дачи (ЛОД) РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, объединив современные методы геоинформационных технологий, почвенно-экологического анализа и данных дистанционного зондирования. Результаты работы подтвердили, что высокая рекреационная нагрузка, сопровождающаяся формированием стихийных троп и уплотнением почвенного покрова, является ключевым фактором деградации территории. Установлено, что за 24-летний период (1990–2014 гг.) содержание свинца

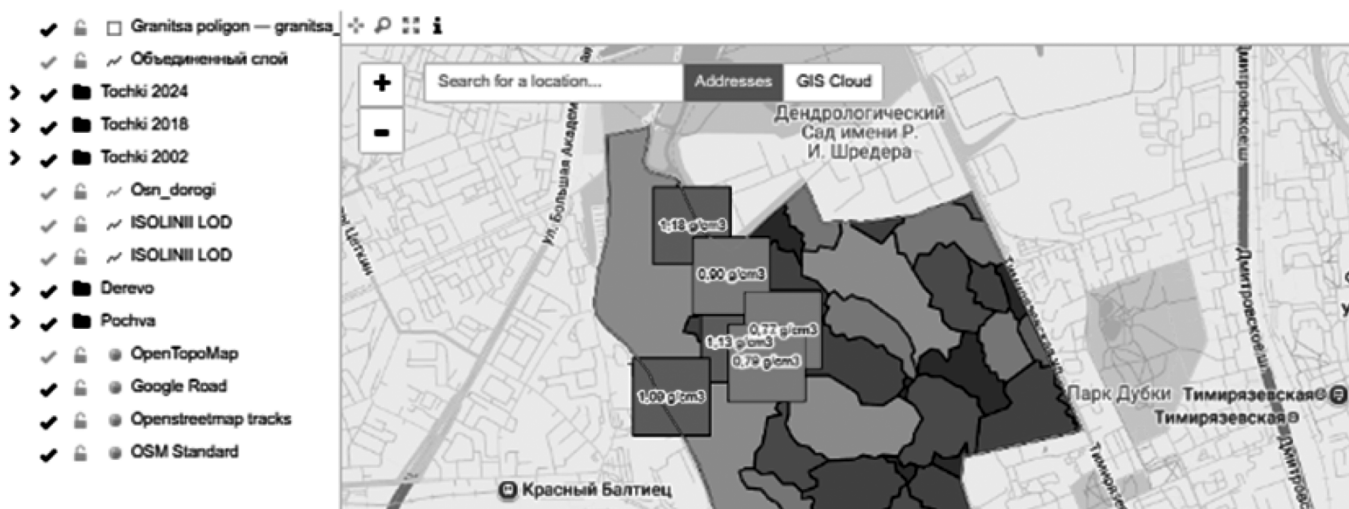


Рис. 4. Интерфейс информационной платформы

в почвах ЛОД увеличилось до 21 %, при этом концентрация его подвижных форм, представляющих наибольшую экологическую опасность, превысила допустимые нормы в 3–5 раз. Эти данные свидетельствуют о критическом накоплении загрязнения, угрожающем не только биоразнообразию, но и здоровью посетителей. [18]

Разработанная в рамках исследования цифровая платформа на базе open-source инструментов (QGIS) продемонстрировала свою эффективность для интеграции гетерогенных данных, включая почвенные пробы, геоботанические характеристики и картографические слои. Её применение позволило визуализировать зоны максимального антропогенного давления, такие как участки с превышением ПДК по свинцу (особенно точки 8, 10, 11) и области интенсивного выпасывания. Это создает основу для оперативного принятия управленческих решений, таких как перераспределение рекреационных потоков, восстановление нарушенных почв и ограничение доступа к наиболее уязвимым участкам. [19]

Практическая значимость работы заключается в её адаптивности: предложенная методика может быть масштабирована на другие урбанизированные природные территории, сталкивающиеся с аналогичными проблемами. Например, интеграция облачных технологий и машинного обучения позволит автоматизировать прогнозирование динамики загрязнения и оптимизировать ресурсы для ремедиации почв. [20]

Для сохранения экологического баланса ЛОД и подобных объектов необходимо:

- Внедрить систему регулярного мониторинга, акцентируя внимание на подвижных формах тяжелых металлов и плотности дорожно-тропиночной сети.
- Разработать образовательные программы для посетителей, направленные на снижение антропогенной нагрузки через осознанное использование маршрутов.
- Использовать данные ГИС-платформы для зонирования территории, выделения буферных зон и создания альтернативных рекреационных площадок.

Методологическая основа платформы сочетает современные ГИС-технологии, методы дистанционного зондирования и полевых исследований, что обеспечивает:

- Высокую точность пространственного анализа
- Оперативность получения данных
- Возможность долгосрочного прогнозирования
- Интеграцию разнородных экологических данных

Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на изучении долгосрочных эффектов загрязнения, разработке биотехнологий для очистки почв и применении Big Data для прогнозирования экологических рисков. Полученные результаты подчеркивают, что только сочетание технологических инноваций и регуляторных мер может обеспечить устойчивое сосуществование урбанизированных ландшафтов и природных экосистем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анахов С.В. Цифровые технологии в экологической практике. Екатеринбург. 2021
2. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картирование растительного покрова России. — М.: ИКИ РАН. — 2016. — 208 с.
3. Варламов А.А. Мониторинг земель — Департамент кадровой политики и образов. мин-ва с/х и продов. РФ. — М., 2000. — с. 108.
4. Волков А.Д. Рекреационная оценка и районирование лесных территорий на ландшафтной основе. Современное состояние и перспективы рекреационного пользования / А.Д. Волков // Тезисный доклад Всесоюзного совещания, 10–12 сентября –1990. — Ленинград. — 1990. — С. 20–21.
5. Воробьев О.Н., Курбанов Э.А. Дистанционный мониторинг восстановительной динамики растительности на гарях Марийского лесного Заволжья // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 84–97. DOI: 10.21046/2070–7401–2017–14–2–84–97.
6. Гришанкова Г.Е. Картографическое моделирование ландшафтных ресурсов туризма в регионе Яковенко и.м. третьи ландшафтно-экологические чтения, посвященные 100-летию со дня рождения Симферополь, 11–14 сентября 2018 года Страницы: 384–387.
7. Дубынина С.С., Напрасникова Е.В. Состояние почв и растительности города Шарыпово // География и природные ресурсы. — 2011. — № 4. — С. 55–55.
8. Котельников Д.А. Туристские территории в структуре туристско-рекреационного пространства региона: идентификация, определение границ, признаки [Электронный ресурс]. / Д.А. Котельников // РППЭ. — 2020. — № 3(113). — С.136–143.
9. Мальков Ю.Г. Мониторинг лесных экосистем / Ю.Г. Мальков. — Марийский гос. техн. ун-т. — Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. — с. 212.
10. Мосина Л.В. Довлетярова Э.А., Андреев Т.Н. Лесная опытная дача РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, как объект экологического мониторинга лесных и лесопарковых ландшафтов мегаполиса Москва. Москва. Российский Университет дружбы народов 2014 г. 221 с.
11. Мусин Х.Г. Природа и насаждения зеленых зон городов: монография / Х.Г. Мусин [и др.]. — М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2006. — 415 с.
12. Опекунова М.Г., Никулина А.Р., Смешко И.В., Кириченко В.С. (2023). Сравнительный анализ эффективности методов биоиндикации при мониторинговых исследованиях состояния окружающей среды в Санкт–Петербурге. Вестник Санкт–Петербургского университета. Науки о Земле, 68 (2).
13. ОСТ 56–100–95 «Методы и единицы измерения рекреационных нагрузок на лесные природные комплексы», 1995.
14. Светлосанов В.А. Устойчивость и стабильность природных экосистем (модельный аспект). Москва, ВНИТИ, серия «Теоретические и общие вопросы географии», т.8, 1990, — 200 с.

15. Тюльпанов Н.М. Лесопарковое хозяйство: учебник / Н.М. Тюльпанов — Л.: Стройиздат, 1975 — 171 с.
16. Ум Токи Жозеф. Дистанционные методы оценки таксационных показателей насаждений на переувлажненных почвах с использованием ГИС-технологий: автореф. дис ... канд. с.-х. наук / Ум Токи Жозеф — Санкт-Петербург: ГОУ ВПО «Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия имени С.М. Кирова», 2009. — 24 с.
17. Шайхалиев Р.Р. Оптимизация рекреационного лесопользования в природном парке «Кандры-Куль», автореферат дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук: 06.03.02 / Шайхалиев Руслан Розильевич; [Место защиты: Башкир. гос. аграр. ун-т]. — Уфа, 2018. — 20 с.
18. Ahrends A., Bulling M.T., Platts P.J., Swetnam R., Ryan C., Doggart N., et al. Detecting and predicting forest degradation: A comparison of ground surveys and remote sensing in Tanzanian forests. *Plants, People, Planet*. 2021; 3(3):268–81. doi: 10.1002/ppp3.10189.
19. Noi P.T., Kappas M. Comparison of Random Forest, k-Nearest Neighbor, and Support Vector Machine Classifiers for Land Cover Classification Using Sentinel-2 Imagery // *Sensors*. 2017. Vol. 18, № 1. P.1–20
20. Zheng Zhu and Xiang Zhu, 2021. Study on Spatiotemporal Characteristic and Mechanism of Forest Loss in Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River // *Forests* / 2021–09/ DOI: 10.3390/f12091242

© Безруких Алексей Игоревич (abezrukih@list.ru); Безруких Евгений Игоревич (genbezrukih@gmail.com);
Сизонова Наталия Александровна (Nat-sizonova@yandex.ru); Мосина Людмила Владимировна (abezrukih@list.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АРТЕФАКТЫ СЕКВЕНИРОВАНИЯ В ДАННЫХ OXFORD NANOPORE TECHNOLOGY: ЛОЖНОПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ NAEGLERIA FOWLERI И ЕГО БИОИНФОРМАТИЧЕСКАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ

OXFORD NANOPORE TECHNOLOGY DATA SEQUENCING ARTIFACTS: FALSE-POSITIVE DETECTION OF NAEGLERIA FOWLERI AND ITS BIOINFORMATICS VALIDATION

A. Zimina
A. Grinev

Summary. In this work, a comprehensive analysis of sequencing artifacts generated using Oxford Nanopore Technology (ONT) is presented, exemplified by the erroneous detection of the free-living amoeba *Naegleria fowleri* in blood samples from patients with malaria (*Plasmodium falciparum*). In all four examined samples, sequences demonstrating nearly 100 % identity with the *N. fowleri* genome according to BLAST analysis were identified. However, subsequent multi-level verification, including phylogenetic analysis, open reading frame (ORF) prediction, and three-dimensional protein structure modeling using AlphaFold3, made it possible to establish the artifactual nature of these findings. The results obtained underscore the critical importance of comprehensive validation of ONT data in clinical studies, where false-positive results can lead to serious diagnostic errors. Particular attention is paid to the analysis of potential sources of artifacts, including systematic sequencing errors, characteristics of bioinformatic data processing, and issues with reference databases.

Keywords: Oxford Nanopore Technology, sequencing artifacts, *Naegleria fowleri*, bioinformatic analysis, false-positive results, primary amoebic meningoencephalitis, AlphaFold3, BLAST analysis.

Зими́на Анастасия Алексе́евна

Стажёр-исследователь,
ФГАОУ ВО Первый Московский государственный
медицинский университет им. И.М. Сеченова
zimina_a_a@staff.sechenov.ru

Гри́нев Алексе́андр Бори́сович

Кандидат биологических наук,
ФГАОУ ВО Первый Московский государственный
медицинский университет им. И.М. Сеченова
sagrinev@yandex.ru

Аннотация. В данной работе представлен комплексный анализ артефактов секвенирования, возникающих при использовании технологии Oxford Nanopore Technology (ONT), на примере ошибочного обнаружения свободноживущей амёбы *Naegleria fowleri* в образцах крови пациентов с малярией (*Plasmodium falciparum*). Во всех четырёх исследованных образцах были идентифицированы последовательности, демонстрирующие практически 100 % идентичность с геномом *N. fowleri* по данным BLAST-анализа. Однако последующая многоуровневая верификация, включающая филогенетический анализ, предсказание открытых рамок считывания (ORF) и моделирование трёхмерной структуры белков с использованием AlphaFold3, позволила установить артефактную природу этих находок. Полученные результаты подчёркивают критическую важность комплексной валидации данных ONT в клинических исследованиях, где ложноположительные результаты могут привести к серьёзным диагностическим ошибкам. Особое внимание уделено анализу возможных источников артефактов, включая систематические ошибки секвенирования, особенности биоинформатической обработки данных и проблемы референсных баз.

Ключевые слова: Oxford Nanopore Technology, артефакты секвенирования, *Naegleria fowleri*, биоинформатический анализ, ложноположительные результаты, первичный амёбный менингоэнцефалит, AlphaFold3, BLAST-анализ.

Введение

Современные технологии секвенирования нового поколения, в частности Oxford Nanopore Technology (ONT), совершили революцию в геномных исследованиях благодаря своей способности генерировать сверхдлинные прочтения ДНК/РНК. Эта особенность делает ONT незаменимым инструментом для анализа структурных вариаций генома, сборки *de novo* и метагеномных исследований. Однако, несмотря на значительные преимущества, технология имеет существенное ограничение — относительно высокий

уровень ошибок по сравнению с платформами коротких чтений, такими как Illumina (средний Q-score около 15 против 30+ у Illumina).

В рамках нашего исследования, посвящённого изучению генетических особенностей *Plasmodium falciparum* у пациентов с малярией, мы столкнулись с неожиданным артефактом — последовательностями, идентифицируемыми как *Naegleria fowleri*. Этот свободноживущий протист известен как возбудитель первичного амёбного менингоэнцефалита (ПАМ) — редкого, но крайне тяжёлого заболевания центральной нервной системы. Биологи-

ческая вероятность обнаружения *N. fowleri* в образцах периферической крови пациентов с малярией крайне мала, так как этот патоген обычно локализуется в спинномозговой жидкости и тканях головного мозга, проникая в организм через обонятельный нерв при контакте с заражённой водой.

Данное наблюдение побудило нас провести всестороннее исследование природы этих последовательностей. Мы выдвинули гипотезу, что обнаружение *N. fowleri* является артефактом, связанным либо с особенностями технологии ONT, либо с ограничениями биоинформатических методов анализа. Для проверки этой гипотезы был применён комплексный подход, включающий филогенетический анализ, оценку функционального потенциала выявленных последовательностей и методы предсказания структуры белков.

Материалы и методы

Характеристика биологического материала и секвенирование

Исследование проведено на образцах цельной крови, полученных от четырёх пациентов с подтверждённым диагнозом малярии, вызванной *Plasmodium falciparum*. Все пациенты были заражены в эндемичных регионах и не имели клинических признаков других инфекционных заболеваний. Выделение тотальной ДНК проводилось с использованием стандартных протоколов с последующей подготовкой библиотек для секвенирования на платформе MinION (Oxford Nanopore Technologies) в соответствии с рекомендациями производителя.

Биоинформатическая обработка данных

Первичная обработка сырых данных включала фильтрацию по качеству (Q-score > 7), обрезку адаптерных последовательностей и удаление низкокачественных прочтений с использованием программы Porechop. Для таксономической аннотации последовательности выравнивались с помощью BLASTn против базы данных NCBI nt (рис. 1). Для дополнительной верификации результатов был применён филогенетический анализ с построением дендрограмм на основе референсных последовательностей *N. fowleri*, поиск открытых рамок считывания (ORF) в выявленных последовательностях, предсказание структуры кодируемых белков с использованием AlphaFold3, визуализация и анализ предсказанных структур в программе PyMOL с оценкой параметров достоверности (pLDDT).

Сравнительный анализ с референсными данными

Для исключения возможности контаминации проведено детальное сравнение с геномом *N. fowleri* (изоляты

ATCC 30894 и ATCC 30863), клиническими изолятами *N. fowleri* из Таиланда [2], референсными последовательностями других видов *Naegleria*. Особое внимание уделено анализу консервативных участков, включая гены рибосомальных РНК и высококонсервативных белков цитоскелета.

Результаты

Обнаружение последовательностей *N. fowleri*

Анализ данных ONT-секвенирования выявил присутствие последовательностей, соответствующих *N. fowleri*, во всех четырёх исследованных образцах. BLASTn-анализ показал 100 % идентичность с референсными последовательностями *N. fowleri* из базы данных NCBI. Однако несколько факторов вызвали сомнения в биологической достоверности этого результата:

1. Отсутствие клинических признаков ПАМ у пациентов.
2. Крайне низкая вероятность обнаружения *N. fowleri* в периферической крови.
3. Отсутствие эпидемиологических данных, указывающих на возможное сочетанное заражение сразу в четырёх разных регионах.

Филогенетический анализ

Филогенетическое дерево, построенное на основе последовательностей 12S рРНК и ITS1, показало, что выявленные последовательности формируют отдельную кладу, не соответствующую известным клиническим изолятам *N. fowleri* (рис. 2). Особенно показательным было отсутствие консервативных участков, характерных для патогенных штаммов этого вида.

Анализ белкового потенциала

ORF-анализ выявил несколько потенциальных белков, однако их функциональная аннотация показала отсутствие типичных для *N. fowleri* патоген-ассоциированных белков (например, Naegleriapore A), низкую консервативность предсказанных последовательностей и преобладание гипотетических белков с неизвестной функцией.

Моделирование структуры белков

Предсказание структуры с помощью AlphaFold3 и последующий анализ в PyMOL выявили низкие показатели достоверности (pLDDT < 50 для большинства доменов), отсутствие стабильных третичных структур и несоответствие предсказанных структур известным белкам *N. fowleri* (рис. 3).

Человек 1

Description	Scientific Name	Max Score	Total Score	Query Cover	E value	Per. Ident	Acc. Len	Accession
✓ Naegleria fowleri Karachi_NF001 strain	Naegleria fowleri	4614	9197	100%	0.0	99.45%	2541	OD957322.1
✓ Homo sapiens clone fosmid ABC8_4_1_000041143400_G2 genomic sequence	Homo sapiens	3940	8368	100%	0.0	89.20%	14353	GQ222231.1
✓ Homo sapiens clone BMMD-RP11_130B16_complete sequence	Homo sapiens	2543	10360	100%	0.0	79.67%	188886	KJ155474.1
✓ Homo sapiens chromosome 22 clone c31p7 map 22q11_complete sequence	Homo sapiens	2394	8821	100%	0.0	80.62%	28862	AC012398.4
✓ Pan troglodytes chromosome 22 clone CH251-171M16_complete sequence	Pan troglodytes	2355	7913	100%	0.0	80.56%	153641	AC275820.1

Человек 2

Description	Scientific Name	Max Score	Total Score	Query Cover	E value	Per. Ident	Acc. Len	Accession
Naegleria fowleri Karachi_NF001 strain	Naegleria fowleri	4614	9197	99%	0.0	99.45%	2541	OD957322.1
Homo sapiens clone fosmid ABC8_4_1_000041143400_G2 genomic sequence	Homo sapiens	3940	8368	99%	0.0	89.20%	14353	GQ222231.1
Homo sapiens clone BMMD-RP11_130B16_complete sequence	Homo sapiens	2543	10360	99%	0.0	79.67%	188886	KJ155474.1

Человек 3

Description	Scientific Name	Max Score	Total Score	Query Cover	E value	Per. Ident	Acc. Len	Accession
✓ Naegleria fowleri Karachi_NF001 strain	Naegleria fowleri	3807	3807	100%	0.0	98.43%	5173	OD956389.1
✓ Naegleria fowleri Karachi_NF001 strain	Naegleria fowleri	278	278	14%	5e-73	83.66%	332	OD957990.1

Человек 4

Naegleria fowleri Karachi_NF001 strain

Sequence ID: OD956389.1 Length: 5173 Number of Matches: 1

Range 1: 2649 to 2903 GenBank Graphics

Next Match Previous Match

Score	Expect	Identities	Gaps	Strand
261 bits(141)	4e-69	217/255(85%)	0/255(0%)	Plus/Minus
Query 3	CAAATAGATGCAATAAAAAATGATAAAGGGGATATCACCACAGATGCCACAGAAATTCAA	62		
Sbjct 2903	CAAATAGACACAATAAAAAATGATAAAGGGGATATCACCACCGATCCCACAGAAATACAA	2844		
Query 63	ACCATCATCAGAGATTATTACAAACAACCTCTATGCACATAAACTAGAAAACCTGGAAGAA	122		
Sbjct 2843	ACTACCATCAGAGAATACTACAAACACCTCTACGCAATAAACTAGAAAATCTAGAAGAA	2784		
Query 123	ATGGATAAATTCCTGGACACTTGACCCCTCCCAAGCCTAAACCAGGAAGAAGTCAAAACC	182		
Sbjct 2783	ATGGATAAATTCCTCGACACATACACCCTCCCAAGACTAAACCAGGAAGAAGTTGAATCT	2724		
Query 183	CTGAATAGACGAATAATAAGGTCTGAAGTTGAGACAGCAATTAAGAGCCTACCACCCaaa	242		
Sbjct 2723	CTGAATAGACCAATAACAGGCTCTGAAATTGTGGCAATAATCAATAGCTTACCAACCAAA	2664		
Query 243	aaaaGCCCAGGTCCA	257		
Sbjct 2663	AAGAGTCCAGGACCA	2649		

Рис. 1. Результаты BLASTn-анализа последовательностей, идентифицированных как N. fowleri

GOLD Organism ID	Organism Name	Phylum	NCBI Taxonomy ID
Go0572210	Naegleria fowleri NF_KFSHRC_1	PROTISTS-HETEROLOBOSEA	5763
Go0572156	Naegleria fowleri ATCC 30894	PROTISTS-HETEROLOBOSEA	5763
Go0384989	Naegleria fowleri ATCC 30863	PROTISTS-HETEROLOBOSEA	5763
Go0047971	Naegleria fowleri	PROTISTS-HETEROLOBOSEA	5763

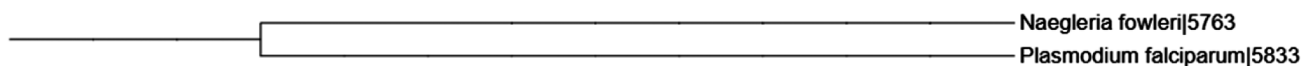


Рис. 2. Филогенетическое дерево на основе последовательностей 12S рРНК

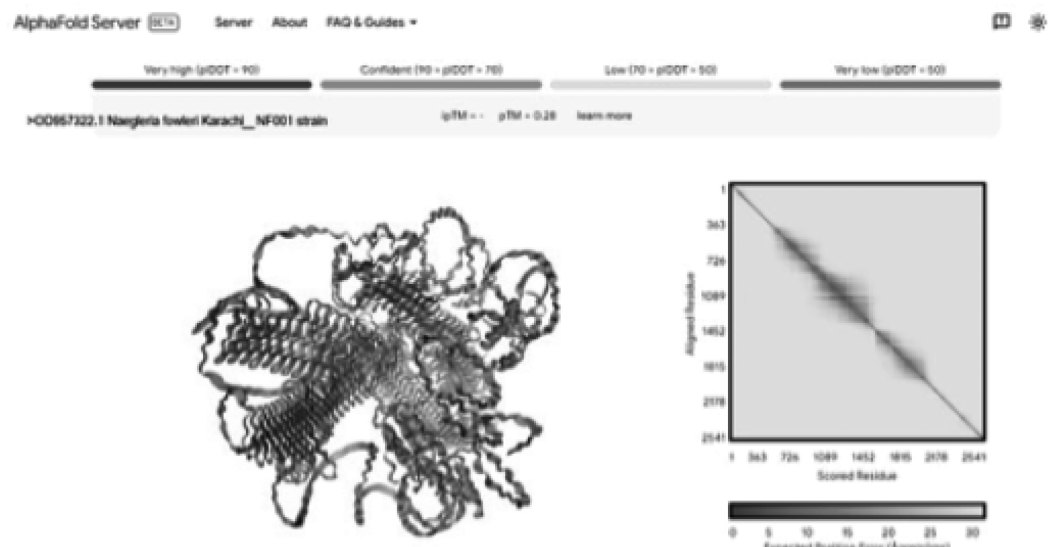


Рис. 3. Моделирование структуры белков с использованием AlphaFold3

Обсуждение

Полученные результаты убедительно свидетельствуют, что обнаружение последовательностей *N. fowleri* в исследуемых образцах является артефактом, связанным с особенностями технологии ONT. Мы выделяем три основных возможных источника таких артефактов:

1. **Систематические ошибки ONT:** высокая частота инсерций/делеций, ошибки при фазировании гомополимерных участков, низкая точность определения нуклеотидной последовательности.
2. **Ограничения биоинформатических методов:** проблемы выравнивания коротких участков гомологии, ошибки аннотации в референсных базах, ограничения алгоритмов BLAST при работе с неполными и смешанными последовательностями.
3. **Биологические факторы:** наличие химерных последовательностей, горизонтальный перенос генов, наличие консервативных доменов у различных микроорганизмов.

Особое значение имеет сравнение с работой [1], где было показано, что даже высококачественные сборки генома *N. fowleri* требуют тщательной валидации. Наши результаты также согласуются с данными [2], подчёркивающими важность комплексного подхода при идентификации патогенных штаммов *N. fowleri*.

Заключение

Проведённое исследование демонстрирует, что обнаружение последовательностей *N. fowleri* в образцах крови пациентов с малярией является артефактом, связанным с особенностями технологии ONT и обработки данных. Полученные результаты подчёркивают необходимость:

1. Разработки стандартизированных протоколов валидации данных ONT.
2. Использования дополнительных методов подтверждения наличия паразита у пациента (ПЦР, секвенирование на платформе Illumina).
3. Критической оценки клинического контекста при интерпретации результатов.
4. Совершенствования биоинформатических методов анализа длинных чтений.

Эти меры особенно важны в клинической диагностике, где ложноположительные результаты могут иметь серьёзные последствия для пациентов. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку алгоритмов автоматического выявления и фильтрации подобных артефактов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Liechti N., Schürch N., Bruggmann R., Wittwer M. Nanopore sequencing improves the draft genome of the human pathogenic amoeba *Naegleria fowleri*. *Sci Rep.* 2019; 9:16040. DOI: 10.1038/s41598-019-52572-0.
2. Soontrapa P. et al. The First Molecular Genotyping of *Naegleria fowleri* Causing Primary Amebic Meningoencephalitis in Thailand. *Front Cell Infect Microbiol.* 2022; 12:931546. DOI: 10.3389/fcimb.2022.931546.
3. Харди А., Дюаркур С., Дефранс М. Фильтрация и анализ шаблонов модификации ДНК с использованием DNAModAnnot. *Методы Mol Biol.* 2023; 2624:87–114.
4. Kheirkhah O. et al. Population genetic structure of the fibrinogen-related protein 1 (FREP1) in Iranian isolates of *Anopheles stephensi*. *Gene.* 2025; 953:149436. DOI: 10.1016/j.gene.2025.149436.

БОТАНИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ СОСНОГОРСКОГО РАЙОНА РЕСПУБЛИКИ КОМИ

BOTANICAL DIVERSITY OF THE SOSNOGORSK REGION OF THE KOMI REPUBLIC

V. Lazareva
V. Seratirova
V. Dudnikov

Summary. Aim. The current state of the vegetation cover of the Sosnogorsky district of the Komi Republic has been studied (using the example of the UGTU ecological and geographical polygon). A systematic, biomorphological and ecological analysis of the most important representatives of the flora of the taiga zone has been carried out, rare and endangered plant species of the region have been identified.

Methodology. The actual basis was its own field research in 2022–2024. During the expeditionary work, more than 150 herbarium sheets were collected, 37 geobotanical descriptions of various types of vegetation were performed. Herbarium collections of vascular and angiosperm plants were carried out by the method of expeditionary research. During the period of field research, traditional methods (geobotanical, floristic) were used, including descriptions of plant communities based on classical methods of geobotanical research. The ecological and dynamic profile with a length of 10 km, including a variety of habitats and plant communities of this area, was laid down and examined. 12 key sites in the northern, central, and southern parts of the profile were examined, each of which carried out standard geobotanical descriptions at sites 10 x 10 m. The basis for the analysis of flora was a list of collected plants.

Results. The results of field studies made it possible to determine the modern botanical diversity of the Sosnogorsk region of the Komi Republic. A systematic, biomorphological and ecological analysis of the most important representatives of the flora of the taiga zone was carried out, rare plant species in need of protection were identified.

Research implications. The results obtained give an idea of the current state of the botanical diversity of the study area and the degree of its anthropogenic disturbance. These studies confirmed not only the boreal features and stability of the structure of the botanical diversity of the region, due to the specific conditions of the flat mid-taiga landscape, but also showed the need for monitoring studies to determine the formation of patterns of transformation of flora and vegetation depending on the latitudinal position of the region and further anthropogenic impacts. The research results can serve as the basis for developing a system for the rational use of the republic's botanical diversity and substantiating the ecological framework of specially protected natural areas. The materials will be used in the compilation of the «Atlas of Plants of the Sosnogorsk Region of the Komi Republic», in the educational process of several specialized courses, conducting educational and practical training, and may also be useful to employees of environmental organizations, biologists and students of biological specialties in the region, local historians, and tourists.

Лазарева Виктория Георгиевна

доктор биологических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный
технический университет»
lazareva-vg@yandex.ru

Сератирова Валентина Васильевна

кандидат географических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный
технический университет»
seratirova-v@yandex.ru

Дудников Виталий Юрьевич

кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный
технический университет»
vdudnikov@ugtu.net

Аннотация. Изучено современное состояние растительного покрова Сосногорского района Республики Коми (на примере эколого-географического полигона УГТУ). Проведён систематический, биоморфологический и экологический анализ важнейших представителей флоры таёжной зоны, определены редкие и нуждающиеся в охране виды растений данного региона. *Цель.* Изучение современного состояния ботанического разнообразия Сосногорского района Республики Коми (на примере эколого-географического полигона УГТУ).

Методы исследования. Фактологической основой послужили собственные полевые исследования в 2022–2024 гг. Собрано более 150 гербарных листов, выполнено 37 геоботанических описаний различных типов растительности. Гербарные сборы сосудистых и покрытосеменных растений осуществлялись методом экспедиционных исследований. В период полевых исследований использовались традиционные методы (геоботанические, флористические), включающие описания растительных сообществ, основанные на классических методах геоботанических исследований. Заложен и обследован эколого-динамический профиль протяжённостью 10 км, включающий разнообразие местообитаний и растительных сообществ данного района. Обследовано 12 ключевых участков в северной, центральной и южной частях профиля, на каждом из которых проведены стандартные геоботанические описания на площадках 10 x 10 м. Основой для анализа флоры послужил список собранных растений.

Результаты. Полученные результаты полевых исследований позволили определить современное ботаническое разнообразие Сосногорского района Республики Коми. Проведён систематический, биоморфологический и экологический анализ важнейших представителей флоры таёжной зоны, определены редкие и нуждающиеся в охране виды растений.

Теоретическая и/или практическая значимость. Полученные результаты дают представление о современном состоянии ботанического разнообразия района исследования, степени его антропогенной нарушенности. Данные исследования подтвердили не только бореальные черты и стабильность структуры ботанического разнообразия региона, обусловленных специфическими условиями равнинного среднетаёжного ландшафта, но и показали необходимость мониторинговых исследований для определения формирования

Keywords: botanical diversity, plant communities, flora, systematic, biomorphological and ecological analysis, taiga zone.

Введение

Растительность и её видовой состав являются наиболее чувствительными индикаторами оценки, степени нарушения и устойчивости ландшафтов, как под влиянием природных, так и антропогенных факторов. Особенно актуальны эти исследования в таёжной зоне, где в силу удалённости и труднодоступности данные о современном состоянии флоры отдельных районов продолжают вызывать интерес [1; 2; 3; 6; 15].

Республика Коми — один из перспективных нефтедобывающих регионов страны, где особое значение имеют природные растительные ресурсы, являющиеся универсальным фитофильтром на пути техногенных выбросов и определяющих актуальность ботанических исследований [5; 6; 7; 10].

Район исследования располагается на северо-востоке Европейской части России, в зоне тундры и лесотундры. Его наибольшая протяжённость с северо-востока на юго-запад составляет 1 275 км, с востока на запад — 695 км, с севера на юг — 785 км [2; 4].

Климат республики умеренно-континентальный: зима холодная и продолжительная, лето — умеренно-теплое. Среднегодовое количество осадков достигает до 600 мм, из них в тёплый период выпадает 400 мм, в холодный — 201 мм. Средняя температура января составляет -15.2°C , июля — $+16.6^{\circ}\text{C}$. Продолжительность вегетационного периода варьируется от 80 до 100 дней. Гидрографическая сеть в пределах региона хорошо развита, где крупными реками являются Печора, Вычегда и Мезень с многочисленными притоками и озёрами. В почвенном покрове на севере таёжной зоны господствуют кислые подзолистые почвы, в южной — дерново-подзолистые с низкой кислотностью и выраженным гумусовым горизонтом [1; 3; 4].

закономерностей трансформации флоры и растительности в зависимости от широтного положения региона и дальнейших антропогенных воздействий. Результаты исследований могут служить основой для разработки системы рационального использования ботанического разнообразия республики, обоснования экологического каркаса особо охраняемых природных территорий. Материалы будут использованы при составлении «Атласа растений Сосногорского района Республики Коми», в учебном процессе ряда специализированных курсов, проведении учебных и производственных практик, также могут быть полезны, сотрудникам природоохранных организаций, биологам и студентам биологических специальностей региона, краеведам, туристам.

Ключевые слова: эколого-географический полигон, ботаническое разнообразие Республики Коми, растительные сообщества, флора, систематический, биоморфологический и экологический анализ, таёжная зона.

Характерной особенностью зонального пространственного распределения растительного покрова региона является неоднородность, обусловленная природными условиями. На равнинах крайнего северо-востока господствует тундра, занимающая до 2 % площади, южнее её сменяет узкая полоса лесотундры (8,1 %), на юге — тайга, (89 %). Доминантами первой зоны являются мхи, лишайники, многолетние травы, кустарнички и невысокие кустарники, древесная растительность отсутствует. Растительность лесотундры характеризуется сочетанием тундровых и древесных фитоценозов [2; 3; 4]. Южнее они сменяются редколесьем, затем тайгой, где фонообразующими видами являются ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) и берёза (*Betula pendula* Roth) [15; 16].

Объект данного исследования — флора эколого-географического полигона Ухтинского государственного технического университета (УГТУ), расположенного в центральной части Республики Коми, на правом берегу р. Ижма Сосногорского района. Абсолютные отметки варьируют от 82 м до 120 м над уровнем моря, географические координаты: $63^{\circ}36'08''$ с.ш. $53^{\circ}52'54''$ в.д., (рис. 1). В геоморфологическом отношении Сосногорский район располагается на пологоувалистом, слабо-холмистом плато, поверхность которого изрезана притоками р. Ижма. Зональными почвами являются глеево-подзолистые и подзолисто-болотные, зональная растительность — лесная, занимающая до 84 % площади района [4]. Согласно ботанико-географическому районированию Е.М. Лавренко и Т.И. Исаченко (1980), район исследования относится к Евразийской таёжной (хвойной) области Урало-Западносибирской провинции Камско-Печорско-Западноуральской подпровинции.

Главной лесообразующей породой являются хвойные леса с участием берёзы и осины.



Рис. 1. Местоположение района исследований [4]

Изучение современной флоры района исследования производилось, как указывалось ранее, на эколого-географическом полигоне УТГУ площадью порядка 100 км² за период 2021–2022 гг. методом маршрутно-флористических исследований, которые сочетались с геоботаническими описаниями важнейших растительных сообществ [13; 15; 18; 22; 23]. При выборе полигона предполагалось присутствие всех возможных ландшафтных сочетаний для этого района, в т.ч. всё ботаническое разнообразие фоновых, зональных, интразональных типов растительного покрова. Общая протяжённость маршрутов за эти годы составила более 500 км. Маршрутные исследования сочетались с локальными. Здесь был заложен профиль протяжённостью 10 км: от восточной окраины г. Сосногорска (пос. Поляна) до правого берега р. Ижма (абс. отм. 110–120 м). Обследовано 12 ключевых участков в северной, центральной и южной частях про-

фия. В результате полевых работ собрано 150 гербарных листов. При камеральной обработке определение растений осуществлялось с использованием ряда определителей высших растений, в т.ч. Коми АССР (1962), Флоры Северо-Востока европейской части СССР (1974) и др. Данные флористических описаний, заносились в базу данных. Названия видов растений уточнялись по сводке С.К. Черепанова (1995), биоморфологический анализ осуществлялся по методике И.Г. Серебрякова (1964), экологический — по А.П. Шенникову (1964), В.А. Мартыненко (1996) и др. [15; 20; 22; 23]. Произведено 37 геоботанических описаний по методике БИН РАН (1974). На площадках 10 x 10 м изучалась структура и видовой состав растительных сообществ различных местообитаний. Количество площадок зависело от характера рельефа и степени мозаичности растительного покрова.

Фитоценоотическое и флористическое разнообразие Сосногорского района

Район исследования находится в подзоне средней тайги, в Мылво-Верхне-Ижемско-мелово-березовом геоботаническом округе, где наблюдается сочетание различных типов растительности, связанное с разными почвенными и геоморфологическими условиями [3; 4; 9; 10]. Для зонального почвенного покрова характерны подзолы и глееподзолистые и болотно-подзолистые почвы. Их варианты, в основном, встречаются на двучленных наносах и приурочены чаще всего к легким породам [3; 4; 8; 9].

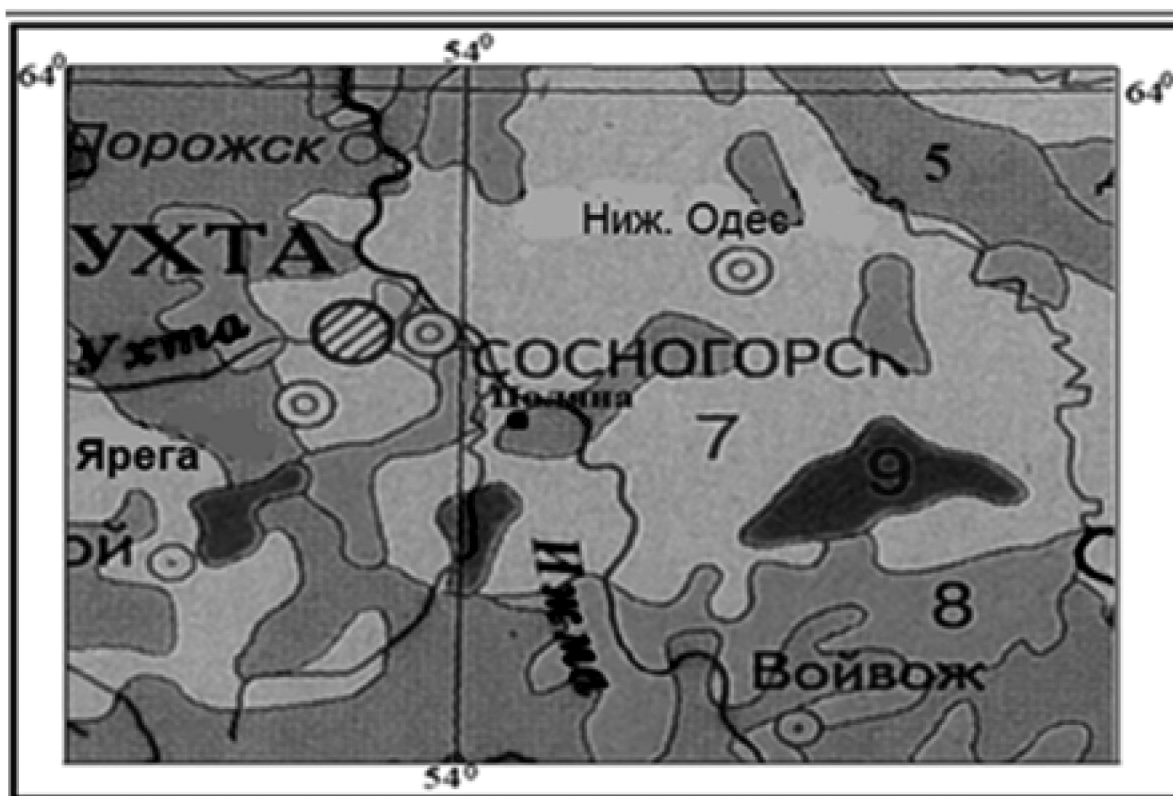
Зональный растительный покров района исследования довольно разнообразен. Здесь наблюдается господство еловых, березовых и смешанных елово-березовых лесов. Сосновые леса встречаются на борových террасах и по окраинам верховых сфагновых болот.

На исследуемом профиле фоновые еловые формации слагают ельник кустарничково-зеленомошный, ельник кисличный, ельник зеленомошный, ельник морошково-

сфагновый и др. сообщества (рис. 2), что подтверждается исследованиями В.А. Мартыненко, Б.И. Груздева, В.А. Канева [10; 14; 15; 16; 17].

Ель сибирская (*Picea obovate* Ledeb.) — эдификатор и основная лесообразующая порода, формирующая темныхвойные леса со специфическими условиями для произрастания: значительное затенение, высокая влажность воздуха и др. К условиям темныхвойного леса приурочены сообщества из: черники (*Vaccinium myrtillus* L.), брусники (*Vaccinium vitis-idaea* L.), голокучника трехраздельного (*Gymnocarpium dryopteris* (L.) Newm.), линнеи северной (*Linnaea borealis* L.), грушанки круглолистной (*Pyrola rotundifolia* L.), майника двулистного (*Maianthemum bifolium* L.), кислицы обыкновенной (*Oxalis acetosella* L.), седмичника европейского (*Trientalis europaea* L.) и др. Моховой покров представлен *Hylocomium splendens*, *Polytrichum commune*, *Pleurozium schreberi* и др.

Сосновые леса в условиях таёжной зоны формируют зональную растительность, но на рассматриваемом профиле они не являются фоновыми, встречаются фрагментарно и представлены: сосняком зеленомошным,



Условные обозначения:

	— еловые леса		— березовые и березово-еловые леса
	— сосновые леса		— болота

Масштаб: 1:500 000 км

Рис. 2. Фрагмент карты «Растительность Республики Коми» [4]

сосняком бруснично-зеленомошным, сосняком лишайниковым, сосняком морошково-сфагновым, сосняком мохово-лишайниковым и сосняком сфагновым. В этих сообществах *Pinus sylvestris* выполняет эдификаторную роль, как на сухих боровых террасах, так и по окраинам болотных массивов. Вместе с тем нижний травяно-кустарничковый ярус отличается доминированием таких теневыносливых видов, как: *Vaccinium myrtillus*, *Antennaria dioica*, *Empetrum nigrum*, *Carex ericetorum*, *Diphasiastrum complanatum*, *Vaccinium vitis-idaea*. Напочвенный покров образован лишайниками (*Lichenophyta*), зелёными (*Polytrichum commune*) или сфагновыми мхами (*Sphagnum*).

Интразональная растительность на водоразделах профиля приурочена к сточным, слабопроточным котловинам и неглубоким депрессиям. Растительный покров слагают кустарничково-кустарничково-осоково-сфагновые верховые болота с единичными экземплярами древесных видов. Мох бурый (*Sphagnum fuscum* (Schimp.) Н. Klinggr) произрастает в сочетании с багульником (*Ledum palustre* L.), карликовой берёзой (*Betula nana*) и кустарничков: брусники (*Vaccinium vitis-idaea*), вороники чёрной (*Empetrum nigrum*), подбела обыкновенного (*Andromeda polifolia* L.), кассандры (*Cassandra calyculata* (L.) D. Don), клюквы (*Vaccinium microcarpon* (Aiton) Pursh и др.). Травянистый ярус формируют *Carex chordorrhiza*, *Carex paupercula*, *Eriophorum vaginatum*, *Rubus chamaemorus* и др.

На изучаемом профиле, проложенном на правом берегу надпойменной террасы, р. Ижма, встречаются антропогенно-нарушенные ландшафты. Здесь они приурочены к водоразделам и склонам, формируя ряд сообществ: березняка морошкового, березняка разнотравно-папоротникового, березняка разнотравно-зеленомошного и березняка долгомошного. В названных сообществах принимают участие следующие виды березы: пушистая (*Betula pubescens*) и повислая (*Betula pendula*). В травянистом ярусе этих сообществ присутствуют: *Geum rivale*, *Tanacetum vulgare*, *Geranium sylvaticum*, *Lamium album*, *Alchemilla vulgaris*, *Aconitum septentrionale*, *Vicia cracca*, *Lathyrus pratensis*, *Trifolium medium*. Сопутствующую роль выполняют злаки: *Poa pratensis*, *Alopecurus pratensis*, *Milium effusum* и др. Следует отметить, что значительная часть перечисленных видов являются рудеральными. Подобные производные фитоценозы характерны для высоких пойм и низких надпойменных террас, на которых находятся населённые пункты.

Таксономическая структура. Флористический список эколого-географического полигона УТГУ включает порядка 100 видов 76 родов 35 семейств, входящих в отделы: цветковые — 83 вида, голосеменные — 6 видов, сосудистые — 11 видов. Последние объединяют отделы: мхи — 6 видов; хвощи — 3 (Х. топяной — *Equisetum*

fluviatile, полевой — *E. arvense*, лесной — *E. sylvaticum*); плауны — 1 (плаун сплюснутый — *Diphasiastrum complanatum*); папоротникообразные — 1 (Голокучник обыкновенный — *Gymnocarpium dryopteris*).

Доминантами флоры полигона являются представители отдела цветковых, преимущественно класса двудольные (*Magnoliopsida*) — 62 вида (62 %), на втором месте — однодольные (*Liliopsida*) — 21 (21 %). Отдел голосеменные включает класс хвойные (*Pinopsida*) — 6 видов (6 %): сибирский кедр (*Pinus sibirica*), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), ель сибирская (*Picea obovata*), лиственница сибирская (*Larix sibirica*) и др.

В спектре ведущих семейств изученной флоры среди цветковых растений к классу однодольные первое место принадлежит семейству Мятликовые (Poaceae) — 14 видов: мятлик луговой (*Poa pratensis*), канареечник тростниковидный (*Phalaroides arundinacea*), пырей ползучий (*Elytrigia repens*) и др.; на второе место к классу двудольные относится семейство Розоцветные (Rosaceae) — 12 видов: морошка (*Rubus chamaemorus*), сабельник болотный (*Comarum palustre*), черёмуха обыкновенная (*Padus avium*) и др. К семейству Вересковые (Ericaceae) относятся 9 видов, к Бобовым (Fabaceae) — 8 видов. По 4 вида содержат семейства: Лютиковые (Ranunculaceae), Астровые (Asteraceae), Берёзовые (Betulaceae), Осоковые (Cyperaceae). Отдел голосеменные представлен семейством Сосновые — 5 видов: сосна сибирская (*Pinus sibirica*) и др. Среди споровых отдел Bryophyta включает 6 видов, принадлежащих к различным семействам. К отделу папоротниковидные относится 1 вид — голокучник обыкновенный (*Gymnocarpium dryopteris*), относящийся к семейству Кочедыжниковые (*Athyriaceae*).

Таким образом, флора эколого-географического полигона УТГУ отражает флористическое разнообразие Сосногорского района Республики Коми. Доминантами являются 10 ведущих семейств, включающих 64 вида.

Биоморфологическая структура флоры района исследования производилась по классификации жизненных форм И.Г. Серебрякова (1962), согласно которой внешняя форма растений — это результат длительного приспособления к определённым экологическим условиям [20].

Во флоре Республики Коми биоморфологическая структура включает: деревья, кустарники, кустарнички, полукустарники, многолетние и однолетние травы, что подтверждается работами регионального характера [5; 6; 7; 8; 9; 10; 14; 18]. По данным наших исследований на полигоне преобладают травянистые биоморфы (67 %). Среди них доминируют поликарпики (67 %), монокарпики составляют всего (6 %), древесные (11 %).

Растительный покров в районе исследования представлен лесными, луговыми и болотными сообществами [15; 16; 17; 19; 21]. Первые произрастают на водоразделах, их флористический состав включает более 50 видов, в т. ч. 11 видов деревьев, формирующих первый ярус: сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), сосна сибирская, кедр (*Pinus sibirica*), ель сибирская (*Picea Obovata*), лиственница сибирская (*Larix sibirica*), берёза повислая (*Betula pendula*) и др. В травяно-кустарниковом ярусе с участием кустарничков зарегистрировано около 20 представителей, среди них: ива козья (*Salix caprea*), можжевельник обыкновенный (*Juniperus communis*), багульник болотный (*Ledum palustre*), черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus*) др. Среди травянистых биоморф доминируют корневищные поликарпики: иван-чай узколистный (*Chamaenerion angustifolium*), синюха голубая (*Polemonium caeruleum*), кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella*), вороний глаз (*Paris quadrifolia*) и др. Из монокарпиков встречаются: марьянник лесной (*Melampyrum sylvaticum*), донник белый (*Melilotus albus*), фаиалка трехцветная (*Viola tricolor*) и др., в мохово-лишайниковом ярусе: сфагнум бурый (*Sphagnum fuscum*), кукушкин лён обыкновенный (*Polytrichum commune*), дикранум метловидный (*Dicranum scoparium*); из плаунообразных плаун сплюснутый (*Diphasiastrum complanatum*) и др.

В растительном покрове республики значительную площадь занимают луга. Они, в основном, приурочены к речным и приозёрным долинам и играют важную роль в структуре флористического разнообразия, являясь основой естественных кормовых угодий. Большой вклад в их изучение внесли: В.М. Болотова (1954), В.А. Мартыненко (1996), Н.С. Котелина (1967), Шушпанниковой Г.С. и др., (2012). По их сведениям, общими для пойменных лугов является 51 вид, для средней тайги — 98 видов. При этом значительное богатство видового состава прослеживается в настоящих и влажных лугах при сравнении с болотистыми (289:149) [6; 15]. В данных исследованиях доминирующим экологическим типом флоры пойменных лугов р. Ижма являются мезофиты — 67 видов. Большинство из них корневищные многолетние травы — 47 видов (*Poa pratensis*, *Trifolium repens*, *Tanacetum vulgare*, *Equisetum sylvaticum*) и др., из древесных биоморф: рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia*), лиственница сибирская (*Larix sibirica*); из кустарников — ива козья (*Salix caprea*), шиповник иглистый (*Rosa acicularis*); из кустарничков — черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus*); из однолетников — марьянник лесной (*Melampyrum sylvaticum*) и др.

На болотистых лугах и болотах преобладают гигрофиты — 19 видов, среди них 8 кустарниковых и кустарничковых жизненных форм: багульник болотный (*Ledum palustre*), голубика обыкновенная (*Vaccinium uliginosum*), клюква болотная (*Oxycoccus palustris*), подбел обыкновенный (*Andromeda polifolia*); гигромезофиты с участием

мезогигрофильных видов, из древесных — черемуха обыкновенная (*Padus avium*), из однолетних и многолетних трав — марьянник лесной (*Melampyrum sylvaticum*), седмичник европейский (*Trientalis europaea*). На болотах доминируют гигрофильные мхи *Pleurozium schreberi*, *Sphagnum fuscum*, отражая почвенные условия и зональность.

Редкие и нуждающиеся в охране виды растений эколого-географического полигона. Сосногорский район является крупной базой углеводородного сырья. Здесь открыто 26 месторождений, из них 16 — разрабатываются, 10 — находятся в консервации; из минерально-сырьевых ресурсов имеются горючие сланцы, запасы уникального торфа, минеральной лечебной воды, гипсов и т. п., следовательно, антропогенная нагрузка на хрупкие северные ландшафты района исследования довольно высока [11; 12; 15; 18; 19; 20; 21; 22].

В связи с этим необходимость выявления редких и нуждающихся в охране видов растений, их всестороннее изучение крайне актуальны в настоящее время. Так, в северной части района исследования на р. Ижма находится заказник Сэбысь, созданный в 1993 г. с целью сохранения эталона мало-нарушенных северо-таёжных ландшафтов центральной части Республики Коми. На территории заказника зарегистрирован 291 вид, относящийся к 166 родам и 63 семействам, из них 3 вида сосудистых растений, включены в Красную книгу Республики Коми. На территории изучаемого эколого-географического полигона из списка Красной книги Республики Коми (2019) зарегистрированы 2 вида [11; 12; 15].

1. *Сосна сибирская, кедр сибирский* (*Pinus sibirica* Du Tour). Семейство Сосновые — Pinaceae. Статус 2 (V) — уязвимый вид. На территории республики встречается в Печоро-Илычском заповеднике, Национальном парке Югыд ва, по рекам Печора, Илыч, Нем;
2. *Пион уклоняющийся, Марьин корень* (*Paeonia apotala* L.). Семейство Пионовые — Paeoniaceae. Статус 3 (R) — редкий вид — произрастает на опушках смешанных лесов и на пойменных лугах высокого уровня. Распространён спорадически, единично или небольшими популяциями.

Лимитирующими факторами обоих видов является вырубка лесов, распашка земель, разработка полезных ископаемых, а также сбор растений в качестве лекарственного сырья и на букеты. Оба вида охраняются в Печоро-Илычском заповеднике, Национальном парке «Югыд ва, в заказниках Сойвинский, Помоздинский, Светлый, Пижемский и во флористических памятниках природы.

Заключение

Исследования проводились в центральной части Республики Коми, на правом берегу р. Ижма на примере эколого-географического полигона Ухтинского госуниверситета. Установлено, что в подзоне средней тайги в Мылво-Верхне-Ижемском елово-берёзовом геоботаническом округе пространственная структура растительного покрова разнообразная и сложная. На боровых террасах доминируют леса еловые, берёзовые и смешанные елово-берёзовые, по окраинам — верховые сосново-сфагновые. На водоразделах еловые формации слагают ельник кустарничково-зеленомошный, ельник кисличный, ельник морошково-сфагновый и др. Интразональная растительность приурочена к неглубоким депрессиям с доминированием кустарничково-кустарничково-осоково-сфагновых верховых болот с единичными древесными видами. На правом берегу р. Ижма на месте вырубленных лесов произрастают луговые сообщества, из лесных: березняк морошковый, березняк разнотравно-папоротниковый, березняк разнотравно-зеленомошный и др. В данном случае берёзовые сообщества формируют одну из стадий восстановительной сукцессии в антропогенно-нарушенных ландшафтах.

В ходе исследований изучено современное флористическое разнообразие полигона. Его слагают 6 отделов, включающие 100 видов 76 родов 35 семейств. Отдел цветковые представлен 83 видами, голосеменные — 6; сосудистые растения — 11. Последние объединяют отделы: мхи — 6 видов, хвощи — 3, плауны — 1, папоротникообразные — 1. Ядром флоры являются 10 ведущих семейств, включающих 67 видов или 67 % от её состава. Первое место принадлежит семейству Мятликовые (Poaceae) — 14 видов, на втором Розоцветные (Rosaceae) — 12 (морошка — *Rubus chamaemorus*, черёмуха обыкновенная — *Padus avium*) и др. По 4 вида содержат семейства: Лютиковые (Ranunculaceae), Астровые (Asteraceae), Березовые (Betulaceae), Осоковые (Cyperaceae), из голосеменных семейство Сосновые (Pinaceae) — 5 видов (сосна сибирская — *Pinus sibirica*)

и др. Среди споровых отдел Bryophyta включает 6 видов, принадлежащих к различным семействам.

Доминирующей жизненной формой на полигоне являются травянистые биоморфы, из них: поликарпики (67 %), монокарпики (всего 6 %), древесные (27 %). В лесных сообществах флористический состав разнообразен и включает в себя: 8 видов мезофильных древесных биоморф — ель сибирская (*Picea obovata*), берёза повислая (*Betula pendula*) и др. В травяно-кустарниковом ярусе с участием кустарничков зарегистрировано 4 гигрофильных вида — багульник болотный (*Ledum palustre*) и др. и 4 вида мезофильных — ива козья (*Salix acaesaprea*) и др. Эта же закономерность прослеживается в мохово-лишайниковом ярусе, где доминируют гигрофильные травянистые полотнодернистые мхи: сфагнум бурый (*Sphagnum fuscum*), кукушкин лён обыкновенный (*Polytrichum commune*), др., из плаунообразных — корневищный плаун сплюснутый (*Diphasiastrum complanatum*) и др.

На пойменных лугах р. Ижмы господствующим экологическим типом являются мезофиты — 67 видов. Большинство из них корневищные многолетние травы 47 видов: *Poa pratensis*, *Equisetum sylvaticum* и др.

На болотах господствуют гигрофильные мхи: *Pleurozium schreberi*, *Sphagnum fuscum* и др., отражая почвенные условия и зональность.

Из списка Красной книги Республики Коми (2019) на территории полигона УГТУ зарегистрированы 2 вида растений, требующих охраны: сосна (кедр) сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour), статус редкости 2 (V) — уязвимый вид и пион уклоняющийся или марьин корень (*Paenonia anomala* L.) статус 3 (R) — редкий вид. Первый произрастает в хвойных лесах, второй — на опушках смешанных лесов и пойменных лугах высокого уровня.

В целом, ботаническое разнообразие полигона является типичным лесным природным комплексом в центральной части Республики Коми и в настоящее время слабо нарушен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агроклиматические ресурсы Коми АССР. М.: Гидрометеиздат, 1973. 136 с.
2. Атлас Коми АССР, М., 1964. С. 112. (1–51).
3. Атлас почв Республики Коми, Сыктывкар. 2010. С. 356.
4. Атлас Республики Коми [Карты] / отв. ред. Е.В. Корниенко. М.: Феория, 2011. 448 с.
5. Биоразнообразие экосистем Крайнего Севера: инвентаризация, мониторинг, охрана: тезис докладов конф. / отв. ред. С.В. Дегтева. Сыктывкар: Ин-т биологии Коми НЦ УрО РАН, 2018. 243 с.
6. Болотова В.М. Луга // Производительные силы Коми АССР. Т. 3. М., 1954. С. 226–263.
7. Геникова Н.В., Крышень А.М. Динамика напочвенного покрова северо-таёжного ельника черничного в первые годы после рубки // Ботанический журнал. 2018. Т. 103. № 3. С. 364–381.
8. Дегтева С.В., Ермаков А.А. Схема развития и размещения особо охраняемых природных территорий Республики Коми // Известия Коми научного центра УроРАН. 2021. № 5. С. 5–9.

9. Исаченко Т.И., Лавренко Е.М. Ботанико-географическое районирование // Растительность Европейской части СССР. Л.: Наука, 1980. С. 10–20.
10. Канев В.А. Мониторинг динамики восстановления растительности на участках с нефтяным загрязнением при различных методах биологической рекультивации в подзоне крайнесеверной тайги / Стационарные исследования лесных и болотных биогеоценозов: экология, продукционный процесс, динамика: тезисы докладов науч. конф. / редкол. К.С. Бобкова и др. Сыктывкар, 2016. С. 67–69.
11. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). М., 2008. 855 с.
12. Красная книга Республики Коми. Сыктывкар, 2019. 768 с.
13. Лавренко Е.М., Корчагин А.А. Полевая геоботаника. Т. 4. М.-Л.: АН СССР, 1974. 336 с.
14. Лиханова И.А. и др. Динамика растительности после сплошнолесосечных рубок ельников черничных (среднетаежная подзона европейского северо-востока России) / И.А. Лиханова, Е.М. Перминова, Г.С. Шушпанникова, Г.В. Железнова, Т.Н. Пыстина, Ю.В. Холопов // Растительность России. СПб. 2021. № 40. С. 108–136.
15. Мартыненко В.А., Груздев Б.И. Сосудистые растения Республики Коми. Сыктывкар, 2008. 157 с.
16. Мартыненко В.А., Груздев Б.И., Канев В.А. Локальные флоры таежной зоны Республики Коми. Сыктывкар, 2008. 75 с.
17. Мартыненко В.А., Груздев Б.И. Флора техногенных ландшафтов таёжной зоны европейского Северо-Востока (Республика Коми). Сыктывкар, 2021. 132 с.
18. Определитель высших растений Коми АССР. М.: АН СССР, 1962. 362 с.
19. Пыстина Т.Н., Херманссон Я. Итоги и перспективы изучения разнообразия лишайников Республики Коми / Лишайники: от молекул до экосистем: мат-лы конф. Сыктывкар. 2019. С. 69–71.
20. Серебряков И.Г. Экологическая морфология растений. Жизненные формы покрытосеменных и хвойных. М.: Высшая школа, 1962. 378 с.
21. Терентьев А., Константинова Т.П., Пыстина Т.Н. Эпифитные лишайники как биоиндикаторы загрязнения воздуха города Сыктывкара / XX Республиканская школьная конференция научно-исследовательских работ по экологии: мат-лы конф. / отв ред. С.М. Плюснина. Сыктывкар, 2019. С. 94–98.
22. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Наука, 1995. 991 с.
23. Шенников А.П. Введение в геоботанику. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1964. 44 с.

© Лазарева Виктория Георгиевна (lazareva-vg@yandex.ru); Сератирова Валентина Васильевна (seratirova-v@yandex.ru);

Дудников Виталий Юрьевич (vdudnikov@ugtu.net)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВЛИЯНИЕ ПРОТИВОМАЛЯРИЙНЫХ ПРЕПАРАТОВ НА МОРФОЛОГИЮ ПАРАЗИТОВ РОДА PLASMODIUM

EFFECT OF ANTIMALARIAL DRUGS ON THE MORPHOLOGY OF PARASITES OF THE GENUS PLASMODIUM

O. Matsaeva
A. Grinev

Summary. Malaria remains a global health concern, exacerbated by parasite resistance and diagnostic challenges in the context of antimalarial drug use. This review consolidates data on the mechanisms of action of key antimalarial agents and their impact on Plasmodium morphology.

The study underscores that drug-induced morphological alterations (e.g., cytoplasmic degradation, pigment accumulation) significantly complicate microscopy-based diagnosis. Such changes elevate the risk of pathogen species misidentification, particularly critical in low-endemic regions and imported malaria cases. The work further highlights the imperative for implementing molecular-genetic diagnostic approaches (PCR, LAMP) to mitigate human error and enhance diagnostic accuracy.

Keywords: malaria, anti-Infective agents, diagnosis, morphology.

Мацаева Ольга Дмитриевна

Стажер-исследователь,
ФГАОУ ВО Первый Московский государственный
медицинский университет им. И.М. Сеченова
trespasserolya@gmail.com

Гринев Александр Борисович

Кандидат биологических наук, доцент,
ФГАОУ ВО Первый Московский государственный
медицинский университет им. И.М. Сеченова
sagrinev@yandex.ru

Аннотация. Малярия является глобальной проблемой здравоохранения, которая усугубляется резистентностью паразитов и сложностью диагностики на фоне приема противомалярийных препаратов. Данный обзор систематизирует данные о механизмах действия основных противомалярийных препаратов и их влиянии на морфологию Plasmodium.

В работе подчеркивается, что морфологические изменения, индуцированные препаратами (например, деградация цитоплазмы, накопление пигмента), существенно осложняют микроскопическую диагностику. Это повышает риск ошибочной идентификации вида возбудителя, что критично в регионах с низкой эндемичностью и завозными случаями. В работе обоснована необходимость внедрения молекулярно-генетических методов (ПЦР, LAMP) для минимизации человеческого фактора и повышения точности диагностики.

Ключевые слова: малярия, антимикробная терапия, диагностика, морфология.

Введение

При малярии пациенты часто обращаются за медицинской помощью после самолечения. Применение химиотерапевтических препаратов с антималярийной активностью приводит к специфическим ультраструктурным изменениям морфологии паразита [3]. Такие изменения затрудняют идентификацию вида возбудителя при микроскопической диагностике и повышают риск постановки неверного диагноза. Понимание механизмов действия основных противомалярийных препаратов может способствовать увеличению эффективности диагностики и лечения малярии.

Материалы и методы

Проведен научно-информационный поиск с использованием ресурсов поисковых систем Google Scholar, PubMed и Elibrary.

Поисковый запрос формировался с использованием ключевых слов и словосочетаний: malaria, morphology

changes, antimalarial drugs, quinolines, antifolates, quinine, artemisinin, naphthoquinones, antibiotics, treatment, therapy, diagnostics, modes of action, mechanism, chemotherapy, pharmacology.

Временная глубина поиска не задавалась, проводился анализ статей, опубликованных за все время, приоритетными считались публикации, вышедшие позднее 2010 года. Критерии включения материалов в обзор: соответствие теме, наибольшее количество цитирований.

Противомалярийные препараты и схемы лечения

Противомалярийные препараты могут достигать своих мишеней либо через мембрану эритроцитов, попадая к малярийному паразиту путем диффузии, либо путем взаимодействия с белковым компонентом мембраны эритроцитов (рецепторами и транспортерами) посредством транспорта, опосредованного переносчиком [7].

Группы противомалярийных препаратов и мишени их действия указаны в табл.1.

Таблица 1.

Основные группы антималярийных препаратов и механизмы их действия

Группа препаратов	Названия препаратов	Механизм действия	Мишень
4-хинолинметанолы	Хинин сульфат, хинин дигидрохлорид, кинимакс, мефлохин (лариам)	Препараты действуют, накапливаясь в пищеварительных вакуолях паразита и образуют комплексы с гемом. Активность гемополимеразы ингибируется, что приводит к накоплению свободного не цитотоксичного гема.	Пищеварительные вакуоли
8-аминохинолины	Примахин, тафенохин		
4-аминохинолины	Хлорохин (делагил), хлорохина фосфат, нивахин		
Антифолаты (антиметаболиты)	I класса: сульфален, дапсон, сульфадоксин	Конкурентный антагонизм с ПАБК, ингибирование дигидроптеротсинтетазы паразита.	Цитозоль
	II класса: триметроприм, прогуанил (бигумаль), пириметамин (дарапим)	Ингибируют дигидрофолатредуктазу плазмодия, что блокирует биосинтез пуринов и пиримидинов. Это ингибирование приводит к нарушению ядерного деления при образовании шизонтов в печени и эритроцитах.	Цитозоль
Антибиотики (тетрациклинового ряда, макролиды)	Тетрациклин, доксициклин, клиндамицин, азитромицин	Ингибируют трансляцию белков внутри апикопласта.	Апикопласт
Артемизинины*	Артемизинин, артесунат, артемизон	Алкилирование белков и липидов. Образование свободных радикалов, повреждающих клеточные компоненты.	Эндоплазматический ретикулум, везикулярные структуры
Нафтохиноны	Автоваквон	Ингибирует митохондриальный электронный транспорт.	Митохондрии
Фенантренметанолы	Халфан, галофентрин	Ингибируют полимеризацию гема.	Пищеварительные вакуоли

Примечания к таблице

ПАБК — парааминобензойная кислота

* Данные препараты рекомендованы к использованию, но не зарегистрированы на территории Российской Федерации [12, с. 3965].

В настоящее время не существует противомаларийных препаратов, обладающих универсальной активностью в отношении всех стадий жизненного цикла плазмодиев. Современная классификация противомаларийных средств основана на их механизме действия, выделяя шизотропные — воздействующие на бесполое формы и гамотропные — подавляющие половые стадии группы. К шизотропным препаратам относят гемошизотропные, направленные на эритроцитарные стадии паразита, и гистошизотропные, эффективные против тканевых форм, персистирующих в гепатоцитах печени.

При всех формах неосложненной малярии начинают лечение с трехдневного курса хлорохина (делагила). Первые морфологические модификации у бесполой формы плазмодиев под воздействием хлорохина проявляются через 1–2 часа после начала терапии и развиваются с течением времени. Сначала при микроскопии видны изменения малярийного пигмента. Отдельные гранулы собираются в скопления с последующим полным исчезновением из цитоплазмы. Параллельно наблюдается пикнотическая трансформация ядра на всех

стадиях развития паразита, наиболее выраженная у кольцевидных (юных) трофозоитов. Цитоплазма у юных форм конденсируется вокруг ядра, а затем полностью редуцируется, далее редуцируется ядро [3].

Половые формы демонстрируют иную динамику: гаметоциты *P. vivax*, *P. ovale* и *P. malariae* сохраняют морфологическую целостность в течение 24–72 часов (исключая *P. falciparum*), далее начинается постепенная дегенерация. Женские гаметоциты указанных видов проявляют повышенную устойчивость к деформационным изменениям по сравнению со зрелыми трофозоитами [3]. Обнаружение половых форм, подвергшихся еще неполной морфологической дегенерации, может привести к неверному суждению о продолжающемся развитии паразита.

Для предотвращения отдаленных рецидивов, обусловленных наличием гипнозоитов в печени при *P. vivax* и *P. ovale*, после основного курса назначают 14-дневный прием примахина. Этот гистошизотропный препарат также проявляет гамотропную активность, воздействуя

на гаметоциты большинства видов плазмодиев. Однако, встречаются штаммы *P. vivax*, резистентные к примахиноу. Основной механизм действия препарата связан с генерацией свободных радикалов, которые нарушают транспорт электронов в клетке плазмодия [4, с. 535].

Особую проблему представляет растущая устойчивость возбудителей малярии к традиционным и новейшим препаратам, включая производные артемизинина. Химически артемизинин представляет собой сесквитерпеновый триоксанный лактон, содержащий эндопероксидный мостик, за счет которого реализуется его противомаларийная активность [10, с. 1709]. Было показано, что артемизинин накапливается в нейтральных липидах и вызывает повреждение мембраны и рибосом паразита, вызывая окислительный стресс. Этот эффект является эндопероксидзависимым, так как аналоги, лишённые эндопероксидного мостика, не маркировали нейтральные липиды и не вызывали окислительного повреждения мембраны [8, с. 329].

В современных клинических протоколах монотерапия уступила место комбинированным схемам лечения, направленным на преодоление лекарственной устойчивости. Применяются следующие комбинированные схемы: малярон (атоваквон + прогунил), саварин (хлорохин + прогунил), коартем или риамет (артемизинин + люмефантрин), фансидар (пириметамин + сульфадоксин)¹ [1, с. 26]. Противомаларийное действие атоваквона обусловлено селективным ингибированием комплекса III (цитохромы b и c1) митохондриальной дыхательной цепи паразита. Это приводит к деполяризации мембранного потенциала митохондрий, нарушению синтеза АТФ и блокаде образования пиримидиновых оснований, что в итоге вызывает гибель плазмодия [12, с. 3964]. Прогунил, представитель класса бигуанидов, усиливает эффект атоваквона, дополнительно нарушая стабильность митохондриальных мембран и угнетая электронно-транспортные процессы [13, с. 1338]. Применение сульфаниламидов, пириметамин (тиндуридин), их комбинированных форм (фансидар, метакельфин), а также тетрациклинов провоцирует характерные ультраструктурные изменения малярийного плазмодия. На начальных этапах воздействия отмечается увеличение количества видимых зерен пигмента, ядро становится светлым и диффузным. На последующих стадиях дегенерации ядро полностью исчезает, а вслед за ним цитоплазма. Из-за артефактов распределения хроматина, цитоплазматических изменений и аномалий пигментации, *P. vivax* или *P. ovale* могут быть ошибочно диагностированы как *P. malariae* [3].

Профилактика

Профилактический прием противомаларийных средств рекомендован лицам, планирующим посещение

¹ препараты назначаются в дозировках, согласно клиническим рекомендациям.

эндемичных по малярии регионов. К современным препаратам для химиопрофилактики относятся мефлохин (лариам) и комбинированное средство атоваквон-прогунил (маларон). Выбор схемы определяется региональным профилем резистентности *Plasmodium falciparum*, а также переносимостью препаратов. В районах с подтвержденной устойчивостью к хлорохину мефлохин остается препаратом первого ряда. Однако, мефлохин является более слабым основанием, чем хлорохин. Из-за этого [6, с. 424], имеет меньшее сродство к гемю по сравнению с хлорохином [5, с. 1547]. Мефлохин не имеет пероксидазной активности против кристаллов гемозоина *Plasmodium* [6, с. 423]. Тем не менее, было показано, что мефлохин эффективен в предотвращении полимеризации молекул гема *in vitro* [11, с. 168]. Также существуют и другие механизмы действия мефлохина. Мефлохин останавливает синтез белка в *Plasmodium falciparum*, действуя на цитозольные 80S-рибосомы паразита [14]. Мефлохин влияет на функцию различных липидсвязывающих белков плазмодия. Недавние исследования показали, что мефлохин конкурентно ингибирует связывание ацил-CoA с белками, связывающими ацил-CoA (Pf-ACBP: Pf-ACBP16, Pf-ACBP99 и Pf-ACBP749) с *P. falciparum* [9, с. 907].

В очагах, где сохраняется чувствительность *P. falciparum* к хлорохину, а также при риске заражения *P. ovale* (возбудитель трехдневной малярии) и *P. malariae* (четырёхдневная малярия), допустимо применение хлорохина в монотерапии или в комбинации с прогунилом. В отдельных эндемичных зонах используется фиксированная комбинация прогунила и хлорохина — саварин [2, с. 19]. Профилактический прием химиопрепаратов не всегда предупреждает развитие малярии. Однако, на данный момент считается, что химиопрофилактика способствует предотвращению тяжелого течения болезни и летальных исходов. Предположительно, химиопрофилактика вызывает изменения морфологии паразитов. Это связано с действием препаратов на структуру плазмодия (табл. 1).

Обсуждение

Механизмы действия многих препаратов еще не до конца изучены. Мишени приложения антималярийных препаратов необходимо понимать для создания новых лекарств и совершенствования диагностики. Прием противомаларийных препаратов может индуцировать артефакты, имитирующие признаки других видов плазмодиев (снижение пигментации, фрагментация ядра). В таких случаях ключевое значение приобретает динамическое наблюдение за паразитемией и сопоставление данных микроскопии с клинико-эпидемиологическим контекстом. Профессиональный анализ всех вышеперечисленных факторов требует высококлассной подготовки специалистов микробиологов и значительного опыта, что может быть трудно реализуемо

в регионах, где малярия встречается как редкое завозное заболевание.

Наиболее перспективным направлением развития этого вопроса вероятно являются молекулярно-генетические подходы к диагностике малярийной инфекции, такие как различные разновидности ПЦР, петлевая изотермическая амплификация. Их чувствительность даже при невысоком уровне паразитемии и нетребовательность к уровню опыта сотрудника делает их удачным решением, однако многообразие таких подходов может ставить в тупик.

Заключение

Применение противомаларийных препаратов приводит к специфическим изменениям морфологии малярийных плазмодиев, которые существенно осложняют

микроскопическую диагностику. Самолечение противомаларийными препаратами вызывает специфические ультраструктурные изменения *Plasmodium*, затрудняющие микроскопическую диагностику. Такие препараты, как 4-аминохинолины, артемизинины и комбинированные схемы, провоцируют деградацию цитоплазмы, пикноз ядра и аномалии пигментации, что может имитировать морфологию других видов плазмодиев. Рост резистентности, включая устойчивость к артемизининам и примахину, требует перехода к комбинированной терапии и поиска новых мишеней.

Профилактический прием антималярийных препаратов снижает риск тяжелых форм заболевания, но может привести к затруднениям при микроскопии из-за наличия артефактов. Для минимизации диагностических ошибок ключевое значение имеют молекулярные методы — ПЦР, изотермическая амплификация.

ЛИТЕРАТУРА

1. Божко В.Г. и др. Малярия: диагностика, лечение, профилактика // *Лекарственный вестник*. — 2010. — Т. 5. — №. 6. — С. 23–28.
2. Божко В.Г. Малярия: актуальные вопросы диагностики, лечения и профилактики / В.Г. Божко, Е.А. Беликова // *Лекарственный вестник*. — 2018. — Т. 12. — № 4(72). — С. 13–20.
3. Методические указания МУК 3.2.987–00 «Паразитологическая диагностика малярии» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 19 октября 2000 г.). Доступен по адресу: <https://base.garant.ru/4183233/>. Ссылка активна на 20 апреля 2025 года.
4. Bates M.D., Meshnick S.R., Sigler C.I., Leland P., Hollingdale M.R. In vitro effects of primaquine and primaquine metabolites on exoerythrocytic stages of *Plasmodium berghei*. *Am J Trop Med Hyg*. 1990;42(6):532–537. doi:10.4269/ajtmh.1990.42.532
5. Chou A.C., Chevli R., Fitch C.D. Ferriprotoporphyrin IX fulfills the criteria for identification as the chloroquine receptor of malaria parasites. *Biochemistry*. 1980;19(8):1543–1549. doi:10.1021/bi00549a600
6. Chou A.C., Fitch C.D. Control of heme polymerase by chloroquine and other quinoline derivatives. *Biochem Biophys Res Commun*. 1993;195(1):422–427. doi:10.1006/bbrc.1993.2060
7. El Saftawy E., Farag M.F., Gebreil H.H., et al. Malaria: biochemical, physiological, diagnostic, and therapeutic updates. *PeerJ*. 2024;12: e17084. Published 2024 Mar 22. doi:10.7717/peerj.17084
8. Hartwig C.L., Rosenthal A.S., D'Angelo J., Griffin C.E., Posner G.H., Cooper R.A. Accumulation of artemisinin trioxane derivatives within neutral lipids of *Plasmodium falciparum* malaria parasites is endoperoxide-dependent. *Biochem Pharmacol*. 2009;77(3):322–336. doi: 10.1016/j.bcp.2008.10.015
9. Kumar A., Ghosh D.K., Ali J., Ranjan A. Characterization of Lipid Binding Properties of *Plasmodium falciparum* Acyl-Coenzyme A Binding Proteins and Their Competitive Inhibition by Mefloquine. *ACS Chem Biol*. 2019;14(5):901–915. doi:10.1021/acscchembio.9b00003
10. O'Neill P.M., Barton V.E., Ward S.A. The molecular mechanism of action of artemisinin—the debate continues. *Molecules*. 2010;15(3):1705–1721. Published 2010 Mar 12. doi:10.3390/molecules15031705
11. Slater A.F., Cerami A. Inhibition by chloroquine of a novel haem polymerase enzyme activity in malaria trophozoites. *Nature*. 1992;355(6356):167–169. doi:10.1038/355167a0
12. Srivastava I.K., Rottenberg H., Vaidya A.B. Atovaquone, a broad spectrum antiparasitic drug, collapses mitochondrial membrane potential in a malarial parasite. *J. Biol Chem*. 1997; 272(7):3961–3966. doi:10.1074/jbc.272.7.3961
13. Srivastava I.K., Vaidya A.B. A mechanism for the synergistic antimalarial action of atovaquone and proguanil. *Antimicrob Agents Chemother*. 1999;43(6):1334–1339. doi:10.1128/AAC.43.6.1334
14. Wong W., Bai X.C., Sleebs B.E., et al. Mefloquine targets the *Plasmodium falciparum* 80S ribosome to inhibit protein synthesis. *Nat Microbiol*. 2017; 2:17031. Published 2017 Mar 13. doi:10.1038/nmicrobiol.2017.31

© Мацаева Ольга Дмитриевна (trespasserolya@gmail.com); Гринев Александр Борисович (sagrinev@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СОВРЕМЕННЫЙ СТАТУС, МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕРЕВОРАЗРУШАЮЩИХ ГРИБОВ — ВОЗБУДИТЕЛЕЙ БЕЛЫХ ГНИЛЕЙ

Польских Светлана Валерьевна

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

CURRENT STATUS, MORPHOLOGICAL FEATURES AND DISTRIBUTION OF WOOD- DESTRUCTING FUNGI — CAUSATIVES OF WHITE ROT

S. Polskikh

Summary. The article considers modern aspects of studying wood-destroying fungi — causative agents of white rot, their ecological role and biotechnological potential. The taxonomic status and systematics of this group of organisms are analyzed considering the latest phylogenetic studies based on molecular genetic data. Particular attention is paid to the genetic aspects of white rot using the example of a detailed analysis of the *Ceriporia lacerata* genome. The mechanisms of action of ligninolytic enzymes of fungi, including laccases, lignin peroxidases and manganese peroxidases, their role in the effective decomposition of wood are considered. The geographical distribution and ecological significance of white rot pathogens in natural ecosystems are described. The prospects for the practical application of these organisms in bioremediation processes, waste treatment of waste treatment facilities and production of biologically active substances are presented. Directions for further research in the context of climate change and anthropogenic impact on forest ecosystems are outlined.

Keywords: wood-destroying fungi, white rot, ligninolytic enzymes, genome, fungal ecology, biotechnology, taxonomy of basidiomycetes.

Аннотация. В статье рассмотрены современные аспекты изучения дереворазрушающих грибов-возбудителей белых гнилей, их экологическая роль и биотехнологический потенциал. Проанализированы таксономический статус и систематика данной группы организмов с учетом последних филогенетических исследований, основанных на молекулярно-генетических данных. Особое внимание уделено генетическим аспектам белой гнили на примере подробного анализа генома *Ceriporia lacerata*. Рассмотрены механизмы действия лигнолитических ферментов грибов, включая лакказы, лигнинпероксидазы и марганецпероксидазы, их роль в эффективном разложении древесины. Описано географическое распространение и экологическое значение возбудителей белых гнилей в природных экосистемах. Представлены перспективы практического применения данных организмов в процессах биоремедиации, обработки отходов очистных сооружений и производстве биологически активных веществ. Обозначены направления дальнейших исследований в условиях изменения климата и антропогенного воздействия на лесные экосистемы.

Ключевые слова: дереворазрушающие грибы, белая гниль, лигнолитические ферменты, геном, экология грибов, биотехнология, таксономия базидиомицетов.

Введение

Леса играют исключительно важную роль в экологической системе. Они предоставляют убежище для животных, адсорбируют и накапливают антропогенные загрязнители, а также способны дезактивировать загрязненные почвы и воду посредством фиторемедиации. Хорошо спланированные и управляемые лесные массивы поддерживают высокий уровень биоразнообразия. Особую ценность представляют старые деревья, которые помимо экологических функций обеспечивают значительную эстетическую ценность.

Однако леса уязвимы для различных нарушений, включая погодные условия и инфекции. Упадок деревьев обычно вызван микробными инфекциями и неблагоприятными почвенными условиями. Среди патогенов

особое место занимают грибы, вызывающие гниение древесины. Как отмечает Schmidt, именно грибы обладают наибольшей способностью разрушать древесину. Механизмы биоразрушения включают рост грибов на поверхности или между внутренними компонентами древесины, выработку внеклеточных ферментов и структурную модификацию основных биополимеров, что приводит к постепенной деградации древесины как в живых деревьях, так и в деревянных конструкциях [1].

Грибы белой гнили являются доминирующей группой дереворазрушающих организмов, составляя около 90 % от всех известных видов. Их ключевая особенность заключается в способности эффективно расщеплять все основные компоненты древесины: целлюлозу, гемицеллюлозу и особенно лигнин. Это делает их уникальными среди других групп дереворазрушающих грибов. После

воздействия грибов белой гнили древесина приобретает характерный обесцвеченный, мягкий и волокнистый вид [2].

Эти грибы встречаются повсеместно и способны колонизировать как хвойные, так и широколиственные породы деревьев. Особенно высокое разнообразие грибов белой гнили наблюдается в тропических экосистемах. Представители данной группы относятся преимущественно к базидиомицетам. Среди наиболее распространенных родов грибов белой гнили, поражающих деревья, можно выделить *Phellinus*, *Ganoderma*, *Trametes* и *Polyporus* [3]. Они способны развиваться как на мёртвой древесине, выполняя функцию сапротрофов и участвуя в круговороте веществ в экосистеме, так и поражать живые деревья, выступая в роли патогенов.

В работе Petre и соавторов отмечается, что грибы белой гнили являются особенно активными разрушителями древесины благодаря их уникальной способности разлагать лигнин [4]. Статистические данные показывают, что представители порядка Polyporales вызывают около 75 % случаев белой гнили в лесных экосистемах умеренного пояса. Исследование Hammel и Cullen демонстрирует, что грибы белой гнили секретируют комплекс лигнолитических ферментов, включая лакказы, лигнин-пероксидазы и марганец-пероксидазы, которые способствуют эффективной деградации древесины на молекулярном уровне. По данным Martinez и соавторов, скорость разложения древесины этими грибами может достигать 2–5 % массы в месяц при оптимальных условиях, что делает их ключевыми агентами в круговороте углерода в лесных экосистемах. Наблюдения Floudas и коллег подтверждают, что изменение климатических условий за последние десятилетия привело к расширению ареала многих видов грибов белой гнили на 10–15 % в северном направлении [5].

Проникновение грибов белой гнили в живые деревья обычно происходит через различные повреждения: раны от неправильной обрезки, трещины коры на старых деревьях, повреждения от ветра или животных. Некоторые виды, такие как *Phellinus noxius*, поражают корневую систему деревьев, проникая через корневые соединения.

Дереворазрушающие грибы-возбудители белых гнилей представляют собой экологически важную группу организмов, играющих ключевую роль в разложении древесины и круговороте веществ в лесных экосистемах. Эти грибы обладают уникальной способностью разрушать все основные компоненты древесины, включая лигнин, что делает их объектом пристального научного интереса как с точки зрения фундаментальной микологии, так и прикладных аспектов биотехнологии [6].

Таксономический статус и систематика

В современной систематике большинство дереворазрушающих грибов, вызывающих белую гниль, относятся к отделу Basidiomycota, преимущественно к классам Agaricomycetes и Tremellomycetes. Согласно последним филогенетическим исследованиям, основанным на молекулярно-генетических данных, среди возбудителей белых гнилей выделяются такие важные порядки, как Polyporales, Hymenochaetales, Russulales и Agaricales [7].

С начала XXI века произошли существенные изменения в таксономии этих организмов. Многие роды были реклассифицированы, появились новые таксономические единицы. Например, ранее единый род *Phanerochaete* сейчас разделен на несколько отдельных родов на основе молекулярно-генетических данных. Современные методы метагеномики и транскриптомики позволили уточнить филогенетические взаимоотношения между различными группами дереворазрушающих грибов и выявить новые, ранее не описанные виды [8].

Для более глубокого понимания биотехнологического потенциала грибов белой гнили важно учитывать современные достижения в области их таксономии и молекулярной биологии. С начала XXI века произошли существенные изменения в таксономии этих организмов. Многие роды были реклассифицированы, появились новые таксономические единицы. Например, ранее единый род *Phanerochaete* сейчас разделен на несколько отдельных родов на основе молекулярно-генетических данных. Современные методы метагеномики и транскриптомики позволили уточнить филогенетические взаимоотношения между различными группами дереворазрушающих грибов и выявить новые, ранее не описанные виды.

В работе Mao et al. (2022) генетический аспект грибов белой гнили представлен подробным анализом генома *Ceriporia lacerata* CGMCC No. 10485. Авторы отмечают, что полногеномное секвенирование выявило размер генома около 36 Mb с содержанием GC 49,33 %, что сопоставимо с геномами других представителей порядка Polyporales (28–60 Mb). Исследование показало высокий уровень полноты сборки генома — 98,4 % по оценке BUSCO, с обнаружением 13,243 генов со средней длиной 1,860 bp, из которых 9,085 были успешно аннотированы [9].

Согласно анализу функциональных аннотаций, в геноме *C. lacerata* было обнаружено 1,163 гена, кодирующих секреторные белки, содержащие N-терминальные сигнальные пептиды без трансмембранных доменов. Филогенетический анализ, основанный как на одиночных ортологических генах, так и на среднем нуклеотидном сходстве (ANI), показал, что роды *Phlebia*, *Ceriporia*, *Phlebiopsis* и *Phanerochaete* эволюционно тесно связа-

ны. Это согласуется с их общей экологической ролью как эффективных разрушителей лигноцеллюлозных материалов и объясняет сходство их ферментативных систем, специализированных на деградации лигнина и других компонентов древесины.

Морфологические особенности

Грибы — возбудители белых гнилей характеризуются рядом специфических морфологических признаков. В зависимости от таксономической принадлежности их плодовые тела могут быть конSOLEВИДНЫМИ, КОПЫТООБРАЗНЫМИ или РАСПРОСТЕРТЫМИ, ОДНОЛЕТНИМИ или МНОГОЛЕТНИМИ. Текстура плодовых тел варьирует от мягкой и мясистой до твердой и деревянистой [10].

Для возбудителей белых гнилей характерно наличие различных типов гифальных систем: мономитической, димитической или тримитической. Наличие сложных гифальных систем обеспечивает прочность плодовых тел и адаптацию к различным экологическим условиям [11].

Ключевой морфологической особенностью этих грибов является наличие развитого ферментативного аппарата для разложения лигноцеллюлозного комплекса. Они продуцируют лигнинпероксидазы, марганецпероксидазы, лакказы и другие ферменты, которые позволяют разрушать лигнин и прочие компоненты древесины, придавая пораженной древесине белесый цвет, отчего происходит название «белая гниль».

Bao-Teng Wang и другие отмечают, что грибы белой гнили обладают уникальным ферментативным комплексом, включающим раффинозоксидазы семейства AA5, что значительно расширяет их потенциал в разложении лигноцеллюлозных материалов [12]. Некоторые виды рода *Flavodon*, в частности *F. ambrosius*, широко культивируются двумя родами амброзиевых жуков, образуя симбиотические отношения, где грибы получают распространение, а насекомые питаются мицелием. По статистическим данным представители рода *Phanerochaete* демонстрируют высокую степень генетического разнообразия в локусах, ответственных за синтез лигнолитических ферментов, что объясняет их широкое экологическое распространение и адаптивность к различным древесным субстратам. Полипоровые грибы семейства *Phanerochaetaceae* обладают наибольшей эффективностью в деградации лигнина, разлагая до 80 % этого компонента в древесине хвойных пород за 12 месяцев активного роста.

Географическое распространение

Дереворазрушающие грибы-возбудители белых гнилей широко распространены по всему миру, но их видовое разнообразие и численность значительно ва-

рируют в зависимости от климатических и экологических факторов. В бореальных лесах умеренной зоны доминируют такие роды как *Fomes*, *Fomitopsis*, *Phellinus* и *Trichaptum* [13].

Тропические леса отличаются наибольшим разнообразием видов возбудителей белых гнилей. Здесь можно встретить многочисленных представителей родов *Ganoderma*, *Trametes*, *Lentinus* и *Polyporus* [14]. В городских и пригородных зонах наблюдается распространение видов, адаптированных к антропогенным воздействиям. Интересно, что географическое распространение этих грибов часто связано с распространением определенных древесных пород, поскольку многие виды проявляют выраженную субстратную специфичность. Некоторые виды могут развиваться только на хвойных или только на лиственных деревьях, в то время как другие обладают более широкой специализацией.

Экологическое значение и практическое применение

Дереворазрушающие грибы-возбудители белых гнилей играют ключевую роль в лесных экосистемах как основные деструкторы древесины. Они участвуют в круговороте углерода и других элементов, формируют микростообитания для других организмов и регулируют структуру древостоя.

С точки зрения биотехнологии, эти грибы представляют значительный интерес для биоремедиации почв и вод, загрязненных ксенобиотиками. Их ферменты успешно применяются в процессах биоотбеливания целлюлозы. Кроме того, из плодовых тел многих видов получают биологически активные вещества, а разработка ферментных препаратов на основе их ферментативных систем имеет большие перспективы в промышленности.

В работе Civzele et al. отмечается, что грибы-возбудители белой гнили представляют собой важную экологическую группу организмов, способных к биodeградации лигноцеллюлозного материала [15]. Эти грибы широко применяются в биотехнологии благодаря их способности секретировать комплекс лигнолитических ферментов, включая лакказы, лигнинпероксидазы и марганецпероксидазы. Исследования показывают, что грибы белой гнили могут эффективно разрушать не только лигнин, но и другие сложные полимеры. Подчеркивается, что интеграция этих грибов в процессы обработки отходов очистных сооружений представляет собой устойчивый подход для снижения воздействия отходов на окружающую среду и обеспечивает экологически безопасный путь утилизации материалов, отфильтрованных во время предварительной очистки сточных вод. Более того, биологическое разложение с использованием этих грибов может приводить не только к производству саха-

ров и биоэнергии, но и к получению ценных химических веществ для других биотехнологических применений.

Современные исследования и перспективы

Современные исследования дереворазрушающих грибов-возбудителей белых гнилей развиваются в направлении изучения геномов и протеомов для выявления генетических основ лигнолитической активности [16]. Активно ведется поиск новых видов с уникальными ферментными системами и исследуются экологические взаимодействия с другими компонентами лесных экосистем.

В условиях изменения климата и антропогенного воздействия на лесные экосистемы происходят изменения в видовом составе и распространении дереворазрушающих грибов, что требует постоянного мониторинга и новых исследований этой важной экологической группы.

Заключение

Анализ современного состояния исследований дереворазрушающих грибов-возбудителей белых гнилей свидетельствует о важности данной группы организмов как с экологической, так и с биотехнологической точки зрения. Эти грибы играют ключевую роль в природных

экосистемах, участвуя в круговороте веществ и разложении лигноцеллюлозных материалов. Их уникальная способность эффективно расщеплять лигнин и другие компоненты древесины обусловлена наличием специализированного ферментативного аппарата, включающего лакказы, лигнинпероксидазы и марганецпероксидазы.

Современные молекулярно-генетические исследования, в том числе полногеномное секвенирование представителей различных таксономических групп грибов белой гнили, позволили существенно пересмотреть их систематику и филогенетические взаимоотношения. Данные о структуре геномов, например *Ceriporia lacerata*, раскрывают генетические основы лигнолитической активности этих организмов, что открывает новые возможности для их биотехнологического применения. В условиях изменения климата и усиливающегося антропогенного воздействия на лесные экосистемы возрастает необходимость дальнейшего изучения экологии, биологии и практического потенциала грибов-возбудителей белых гнилей. Их использование в процессах биоремедиации, обработки отходов и производстве ценных биохимических соединений представляет собой перспективное направление устойчивого развития и экологически безопасных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Косумов Р.С. Лесные экосистемы как стабилизирующие факторы антропогенного воздействия на окружающую среду / Р.С. Косумов, М.Д. Демельханов // Молодой ученый. — 2016. — № 3 (107). — С. 415–420. — URL: <https://moluch.ru/archive/107/25614/> (дата обращения: 12.05.2025).
2. Corbu V.M., Gheorghe-Barbu I., Dumbravă A.Ş., Vrâncianu C.O., Şesan T.E. Current Insights in Fungal Importance-A Comprehensive Review // *Microorganisms*. — 2023. — Vol. 11, № 6. — P. 1384. — DOI: 10.3390/microorganisms11061384.
3. Hong Y., Tan J.Y., Xue H., Chow M.L. A Metagenomic Survey of Wood Decay Fungi in the Urban Trees of Singapore // *Journal of Fungi*. — 2023. — Vol. 9, № 4. — P. 460. — DOI: 10.3390/jof9040460.
4. Li T., Cui L., Song X., Cui X., Yulian W., Tang L., Mu Y., Xu Z. Wood decay fungi: an analysis of worldwide research // *Journal of Soils and Sediments*. — 2022. — Vol. 22. — DOI: 10.1007/s11368-022-03225-9.
5. Wijas B.J., Flores-Moreno H., Allison S.D., Cernusak L.A., Cheesman A.W., Eggleton P., Kooyman R.M., Powell J.R., Zanne A.E. Decadal recovery of fungal but not termite deadwood decay in tropical rainforest // *Journal of Applied Ecology*. — 2025. — DOI: 10.1111/1365-2664.70053.
6. Веревкин А.Н., Кононов Г.Н., Сердюкова Ю.В., Зайцев В.Д. Биodeградация древесины ферментными комплексами дереворазрушающих грибов // Вестник МГУЛ — Лесной вестник. — 2019. — № 5. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/biodegradatsiya-drevesiny-fermentnymi-kompleksami-derevorazrushayuschih-gribov> (дата обращения: 12.05.2025).
7. Змитрович И.В., Фирсов Г.А., Бондарцева М.А., Волобуев С.В., Большаков С.Ю. Базидиомицеты — возбудители хронических гнилей деревьев Ботанического сада Петра Великого Ботанического института имени В.Л. Комарова РАН: диагностика, биология, распределение по территории // *Hortus botanicus*. — 2018. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bazidiomitsety-vozbuditeli-hronicheskikh-gniley-dereviev-botanicheskogo-sada-petra-velikogo-botanicheskogo-institut-a-imeni-v-l-komarov-a> (дата обращения: 13.05.2025).
8. PLAMIC2024: материалы IV Международной научной конференции «Растения и микроорганизмы: биотехнология будущего» и III Всероссийской конференции с международным участием «Механизмы адаптации микроорганизмов к различным условиям среды обитания». Байкальск, 15–22 сентября 2024 г. / отв. ред. И.А. Тихонович. — Иркутск: Издательство ИГУ, 2024. — 444 с.
9. Mao Z., Yang P. Whole-Genome Sequencing and Analysis of the White-Rot Fungus *Ceriporia lacerata* Reveals Its Phylogenetic Status and the Genetic Basis of Lignocellulose Degradation and Terpenoid Synthesis // *Frontiers in Microbiology*. — 2022. — Vol. 13. — 880946. — DOI: 10.3389/fmicb.2022.880946.
10. Wu F., Guo Z., Cui K., Dong D., Yang X., Li J., Wu Z., Li L., Dai Y., Pan T. Insights into characteristics of white rot fungus during environmental plastics adhesion and degradation mechanism of plastics // *Journal of Hazardous Materials*. — 2023. — Vol. 448. — P. 130878. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.130878.
11. Kuribayashi T., Lankinen P., Hietala S., Mikkonen K. Dense and continuous networks of aerial hyphae improve flexibility and shape retention of mycelium composite in the wet state // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. — 2021. — Vol. 152. — P. 106688. — DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106688.

12. Wang B.-T., Hu S., Oh D.N., Jin C.-Z., Jin L., Lee J.M., Jin F.-J. Insights into the Lignocellulose-Degrading Enzyme System Based on the Genome Sequence of *Flavodon* sp. x-10 // *International Journal of Molecular Sciences*. — 2025. — Vol. 26, № 3. — P. 866. — DOI: 10.3390/ijms26030866.
13. Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы, и их роль в лесных экосистемах (XIII Чтения памяти О.А. Катаева) / Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Санкт-Петербург, 28 октября — 01 ноября 2024 г. / под ред. А.В. Селиховкина, Ю.Н. Баранчикова, Н.Н. Карлун, М.Ю. Мандельштам и В.И. Пономарёва. — Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2024. — 128 с.
14. Грибные сообщества лесных экосистем. Том 2 / Под ред. В.Г. Стороженко, В.И. Крутова. — Москва — Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2004. — 311 с.
15. Civzele A., Stipniece-Jekimova A.A., Mezule L. Biodegradation of screenings from sewage treatment by white rot fungi // *Fungal Biology and Biotechnology*. — 2025. — Vol. 12. — P. 7. — DOI: 10.1186/s40694-025-00198-5.
16. Kijpornyongpan T., Schwartz A., Yaguchi A., Salvachúa D. Systems biology-guided understanding of white-rot fungi for biotechnological applications: A review // *iScience*. — 2022. — Vol. 25, № 7. — P. 104640. — DOI: 10.1016/j.isci.2022.104640.

© Польских Светлана Валерьевна (future29@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

УПРАВЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИЕЙ СОТРУДНИКОВ КОМПАНИИ И БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ

MANAGING THE TRAJECTORY OF COMPANY EMPLOYEES AND BIG DATA

**S. Valeev
Zhang Xilu**

Summary. The problem of managing the professional trajectory of employees of an organization is considered based on the implementation of modern information technologies, such as big data analysis and machine learning methods. It is noted that the use of big data technologies to improve the efficiency of trajectory management processes requires a high data culture in the company. The most important thing in forming this culture is a careful attitude to the information assets of the organization. Data collection requires certain efforts and investments.

Keywords: organizational management, employee professional trajectory, big data, information technology, data collection stages.

Валеев Сагит Сабитович

Доктор технических наук, профессор,
Уфимский университет науки и технологий
vss2000@mail.ru

Чжан Силу

Аспирант, Уфимский университет науки и технологий
zhangxilu@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается задача управления профессиональной траекторией сотрудников организации на базе внедрения современных информационных технологий, таких как анализ больших объемов данных и методы машинного обучения. Отмечается, что использование технологий больших данных для повышения эффективности процессов управления траекторией требует высокой культуры данных в компании. Самое главное в формировании этой культуры — бережное отношение к информационным активам организации. Сбор данных требует определенных усилий и инвестиций.

Ключевые слова: управление организацией, профессиональная траектория сотрудника, большие данные, информационные технологии, этапы сбора данных.

Введение

Компания, управляемая данными (Data-Driven Company) — это предприятие, бизнес-процессы и организационная структура которого построены на основе интеграции информационных потоков и их непрерывной аналитики с применением методов машинного обучения на всех этапах жизненного цикла компании [1]. Одной из актуальных задач управления организацией, решаемых в компаниях этого типа, является управление профессиональной траекторией сотрудников [2].

Решение задачи управления траекториями сотрудников организации с применением методов машинного обучения необходимо для разработки индивидуальных маршрутов профессионального развития и адаптации сотрудников в рамках плана развития организацией, что позволяет повысить лояльность сотрудников и способствовать эффективной организации внутреннего карьерного роста [3,4]. Эффективность применения методов машинного обучения базируется на достаточно большом объеме используемых данных [5]. Рассмотрим далее особенности основных этапов сбора данных, отражающих культуру данных в компании.

Жизненный цикл сбора данных

На первом этапе жизненного цикла (ЖЦ СД) сбора данных необходимо провести аудит данных, исполь-

зуемых в компании. Основная цель аудита — проанализировать имеющиеся данные, необходимые для выполнения алгоритмов анализа траектории сотрудников в соответствии со стандартами и регламентами. Основные процедуры реализации этапа: составление перечня задач формирования необходимых массивов данных о сотрудниках и подразделений, в которых они работают, поиск возможных решений необходимых для реализации этого этапа.

Отметим, что обычно данные собираются для формирования стандартных отчетов, т.е. целью в данном случае является формирование отчета. После этого не всегда ясно, что делать с имеющимися массивами данных. Их можно оставить, а можно удалить. При хранении документов и файлов баз данных не всегда понятно, как долго необходимо хранить данные. Процесс аудита также вызывает много вопросов, связанных с ценностью информации, ее старением.

В настоящее время хранение данных стало частью отрасли обработки данных, и эти вопросы решаются в рамках облачного хранения информационными компаниями. Однако, при хранении данных в системах хранения подрядчиков, в свою очередь, возникает задача сохранения конфиденциальности информационных ресурсов.

На втором этапе подготовки данных ЖЦ СД необходимо выполнить классификацию имеющихся данных. Основная цель: классифицировать имеющиеся данные и их источники. Основные процедуры реализации этого этапа: определение наличия данных и источников информации. Далее, необходимо сформировать список необходимых данных, которые утеряны или могут быть утеряны. Необходимо также сформировать список недостающих для анализа траектории данных из сертифицированных источников информации. Необходимо сформировать список данных, которые нужны, но их источники недоступны или неизвестны.

Для интеллектуального анализа данных требуются дополнительные ресурсы организации. Поддержание жизненного цикла данных требует соблюдения требований стандартов и регламента доступа к персональным данным. В ряде случаев, при обработке больших массивов данных могут использоваться информационные ресурсы других компаний. В этом случае возникает задача о качестве данных, предоставляемых сторонней компанией.

На третьем этапе ЖЦ СД проводится классификация данных по приоритету их использования. Основная цель: определить приоритеты и выделить наиболее важные ресурсы получения данных. Основные процедуры реализации этого этапа: оценка сложности и стоимости получения данных, формирование списка приоритетов при формировании набора данных и оценка затрат на их сбор.

Необходимо учитывать, динамику приоритетов на различных этапах профессиональной траектории сотрудника организации. Отметим, что следует помнить о противоречиях, которые могут возникнуть при выборе шкалы его приоритетов. Разработка шкалы является сложной оптимизационной задачей, поиск решения которой может быть найден на базе методов линейного программирования и многозначной логики. Стоимость получения данных и формирование набора данных во многом зависит от размера организации и профиля ее деятельности.

На четвертом этапе ЖЦ СД проводится анализ используемых методов процесса сбора данных. Основная цель: повышение эффективности используемых данных и процедур их регулярного обновления. Основные процедуры реализации этапа: в трудовой функции персонала, отвечающего за сбор данных, необходимо описать методы и процедуры сбора данных о траекториях сотрудников на основе утвержденных регламентов организации, а также процессы ввода данных в информационную систему.

Следует отметить, что трудоемкие операции, связанные с обработкой журналов, отчетов и занесение этих данных в информационную систему, должны выполняться

персоналом, ответственным за обработку данных. Необходимо использовать алгоритмы проверки введенных данных для исключения ошибок операторов.

В рамках внедрения культуры данных в организации важно понимать, что сбор данных требует участия квалифицированных специалистов разных уровней.

На пятом этапе ЖЦ СД определяется способ хранения набора данных. Основная цель этого этапа: обеспечение надежного хранения данных и возможности доступа к ним по требованию. Основные средства, используемые для эффективного хранения данных — распределенные хранилища данных на базе облачных технологий. При этом необходимо обеспечить эффективные меры защиты данных на основе распределения прав доступа.

Как следует из описания основных этапов работы с данными (формирование культуры данных), это достаточно трудоемкий процесс. В настоящее время в современных компаниях вводятся должности ответственных за данные. Отметим, что это важные этапы на пути к применению больших данных для решения задач управления профессиональной траекторией сотрудников компании.

Архитектура системы сбора и хранения данных

Для решения всех вышеперечисленных задач поддержки ЖЦ СД необходима реализация процедур процесса сбора данных на основе архитектуры сбора и хранения данных. Она включает распределенную базу данных и перечень таблиц данных, отражающих состояние сотрудника на профессиональной траектории.

На рис. 1 представлен процесс формирования потока данных о состоянии сотрудника на профессиональной траектории в рамках архитектуры ЖЦ СД,

где:

- DB_P — база данных достижений сотрудника, отражающих его состояние на профессиональной траектории, эта информация заносится в текстовых документах;
- DB_S — база данных результатов выполнения запланированных показателей сотрудника, эта информация заполняется автоматически из CRM-системы компании;
- DB_f — база данных с результатами анализа отклонений показателей сотрудников от заданных, эти данные используются для разработки моделей отклонения показателей;
- DB_h — база данных с информацией о причинах увольнений сотрудников, эта информация используется для разработки систем прогнозирования увольнений сотрудников.

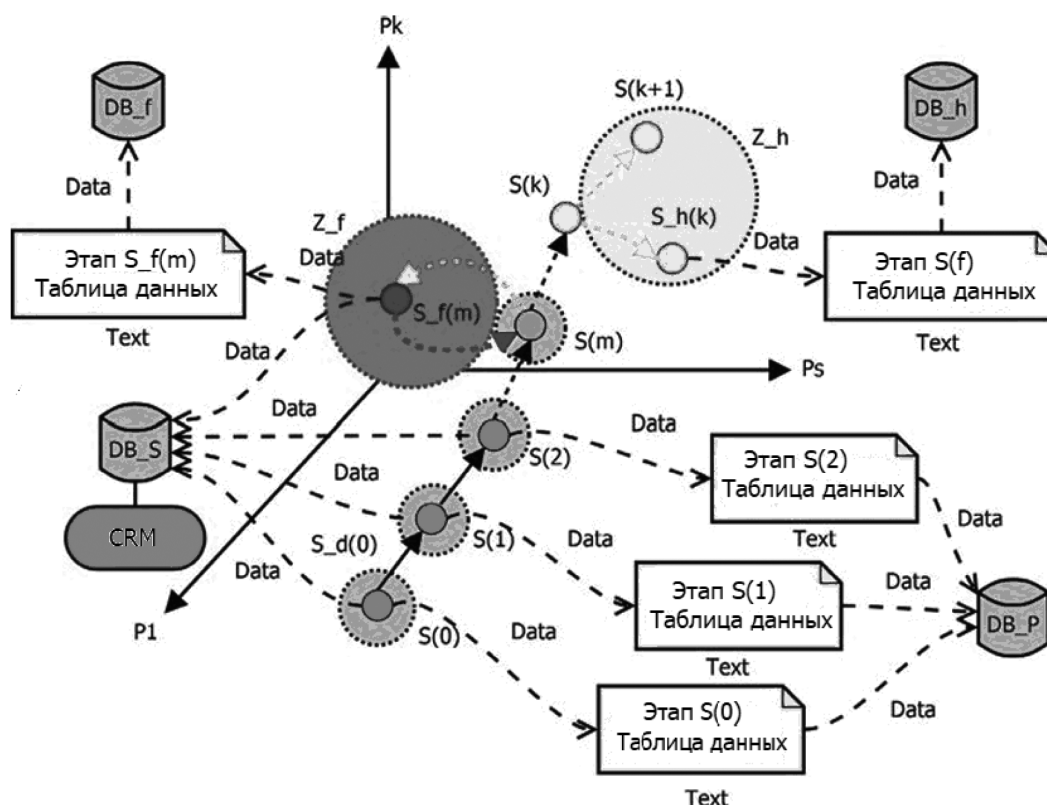


Рис. 1. Архитектура системы поддержки ЖЦ СД

Указанный набор взаимосвязанных процедур предлагается реализовать в рамках обобщенной архитектуры системы управления рисками оттока сотрудников на базе многоуровневой интеллектуальной системы управления и применения вычислений на базе технологий обработки больших массивов данных и методов машинного обучения.

Заключение

Культура данных требует внедрения новых информационных технологий, основанных на системах хранения

данных и внедрении методов машинного обучения. Задача управления профессиональной траекторией сотрудников компании традиционно возлагалась на HR отделы, однако развитие методов аналитики сместило акцент в сторону бизнес-процессов, связанных с аналитикой больших данных и бережливым отношением к данным. В статье рассмотрены основные этапы сбора данных и их хранения, а также обсуждается архитектура системы сбора и хранения данных на различных этапах жизненного цикла сотрудников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Valeev S.S., Kondratyeva N.V. Analysis of business processes in a distributed organizational and technical system based on snapshots // Computational technologies. — 2023. — V. 28(1). — С. 41–47.
2. Валеев С.С., Чжан С. Управление состоянием многопользовательской системы на основе методов машинного обучения // Международное сотрудничество в области науки и технологий: взгляд в будущее. Материалы Международной конференции в рамках научно-образовательного сотрудничества Китая и России «Один пояс, один путь». — Уфа: Издательство УНПЦ «Издательство УГНТУ». — 2024, Уфа. — С. 11–13.
3. Гончаров К.А. Многокритериальный анализ альтернатив в задачах управления кадровым составом в организации // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2024. — № 7–2. — С. 56–61. DOI 10.37882/2223–2966.2024.7–2.07.
4. Попазова О.А., Шихова Н.Н. Оценка и аттестация персонала. — СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2019. — 79 с.
5. Шале Ф. Глубокое обучение на Python. — 2-е межд. изд. — СПб.: Питер, 2023. — 576 с.

© Валеев Сагит Сабитович (vss2000@mail.ru); Чжан Силу (zhangxilu@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ОРГАНИЗАЦИИ ОБУЧЕНИЯ ВОДИТЕЛЕЙ В АВТОШКОЛАХ

FEATURES OF DESIGNING AN INFORMATION SYSTEM TO SUPPORT THE ORGANIZATION OF DRIVER TRAINING IN DRIVING SCHOOLS

**I. Gantts
M. Petrunin**

Summary. The introduction of modern technologies into the educational process of driving schools significantly improves the quality of driver training, making training more effective and convenient for all participants. The article discusses the design features of an information system for optimizing learning processes in driving schools. The shortcomings of current management methods have been identified. Special attention is paid to data security and technical support issues. The concept of a system automating key processes in a driving school is proposed.

Key words: information system, software design, business process automation, education digitalization, learning process management, driving school.

Гантц Ирина Сергеевна

кандидат экономических наук, доцент, Российский технологический университет МИРЭА, г. Москва
gantc@mirea.ru

Петрунин Максим Александрович

Российский технологический университет МИРЭА, г. Москва
max2003255@gmail.com

Аннотация. Внедрение современных технологий в образовательный процесс автошкол значительно повышает качество подготовки водителей, делая обучение более эффективным и удобным для всех участников. В статье рассмотрены особенности проектирования информационной системы для оптимизации процессов обучения в автошколах. Выявлены недостатки текущих методов управления. Особое внимание уделено вопросам безопасности данных и техническому обеспечению. Предложена концепция системы, автоматизирующей ключевые процессы в автошколе.

Ключевые слова: информационная система, проектирование программного обеспечения, автоматизация бизнес-процессов, цифровизация образования, управление учебным процессом, автошкола.

Использование информационных технологий в организации учебной деятельности, в том числе в автошколе, важно в современном образовательном процессе. Актуальность этой темы в рамках выбранной предметной области обусловлена необходимостью обеспечения эффективности и качества подготовки водителей, а также оптимизации внутренних процессов в автошколах. Процесс поддержки обучения включает в себя планирование учебных занятий, управление ресурсами, контроль за выполнением учебных программ и координацию работы преподавателей и административного персонала. Использование специализированной информационной системы может существенно улучшить организацию этих процессов, повысить прозрачность и оперативность принятия решений, а также снизить административные затраты.

Целью исследования является изучение особенностей проектирования информационной системы, которая будет способствовать оптимизации внутренних процессов в автошколе. Предметом исследования выступает процесс поддержки организации обучения водителей. Разработка программного решения в данной области

позволит повысить уровень цифровизации образовательного процесса, упростить администрирование учебных мероприятий и минимизировать вероятность ошибок при обработке данных [1]. Проектируемая система будет ориентирована на сотрудников автошколы, которые будут использовать ее для выполнения своих рабочих задач и управления учебной деятельностью [2].

В рассматриваемом процессе участвуют менеджеры по работе с клиентами, заведующий учебной частью, преподаватели и инструкторы. В данном случае клиенты — это люди, подающие заявку на обучение.

Бизнес-процесс начинается с подачи заявки на обучение. Менеджер по работе с клиентами регистрирует ее в электронной таблице, фиксируя все необходимые сведения о заявителе. После регистрации заявки менеджер проверяет предоставленные клиентом документы: паспорт, медицинскую справку, фотографии и другие. Если они не соответствуют требованиям, менеджер запрашивает корректную информацию. После подтверждения правильности данных он оформляет личное дело ученика и оформляет договор на обучение.

Далее заведующий учебной частью формирует учебные группы. Затем проверяет занятость преподавателей и инструкторов. Если нет свободных сотрудников, заведующий сообщает об этом клиенту, в этом случае ученик должен подождать пока они освободятся. Если есть свободные преподаватели и инструкторы, заведующий распределяет их и составляет расписание занятий, которое затем рассылается всем участникам занятий по электронной почте.

Когда проходит очередное теоретическое занятие, преподаватель записывает посещение в электронную таблицу и выставляет оценку. После этого, когда проходит практическое занятие, инструктор также записывает посещение и выставляет оценку за занятие.

Если курс занятий не завершен, то ученику необходимо посетить еще некоторое их количество. Если же курс занятий завершен, то заведующий учебной частью составляет отчет по посещаемости на основе имеющихся данных, а также составляет отчет по успеваемости ученика. Заведующий оценивает готовность ученика к экзамену в ГИБДД. Если обучающийся не готов к экзамену, значит необходимо пройти еще некоторое количество занятий, таким образом, ученик продолжает обучение до тех пор, пока не завершит курс занятий и не будет готов к экзамену.

Когда ученик завершил курс занятий и готов к экзамену в ГИБДД, заведующий учебной частью формирует документы для выпуска ученика. Менеджер по работе с клиентами передает эти документы ученику, и процесс завершается выпуском водителя из автошколы.

В ходе исследования описанного выше типового процесса для него выявлены характерные особенности:

- при выполнении процесса существует риск дублирования информации в различных документах и таблицах, что может привести к избыточности данных и повышенной трудоемкости;
- отсутствие централизованной системы для сбора и регистрации информации может привести к ошибкам и несоответствиям в данных;
- отсутствие информационной системы затрудняет расчет и анализ показателей, необходимых для процесса поддержки организации обучения;
- обработка информации характеризуется высокой трудоемкостью из-за ручного подхода и при использовании офисных приложений.

Взаимодействие между участниками процесса требует передачи документов в бумажном или электронном виде, что замедляет выполнение отдельных этапов.

Информационная система должна предоставлять сотрудникам автошколы инструменты для выполнения

основных задач. В рамках функциональных требований определены ключевые возможности [3]. Система обеспечивает регистрацию заявок и обучающихся с указанием личных данных и сроков прохождения курса. Формирование учебных групп включает указание учеников и преподавателей. Расписание занятий включает создание, редактирование и распределение преподавателей по группам, а инструкторов — по ученикам. Учет посещаемости занятий ведется с автоматическим формированием сводных отчетов под контролем преподавателей и инструкторов. Результаты занятий вносятся в систему, которая автоматически обрабатывает данные для итоговых сводок по успеваемости. Система генерирует аналитические отчеты для руководства, охватывающие посещаемость, успеваемость, загруженность сотрудников, выпуск учеников из автошколы и конверсию заявок. Она также управляет данными о преподавателях и инструкторах, включая их расписание и закрепленные группы/ученики, а также автомобили.

Для обеспечения корректной работы системы и удобства ее использования были сформированы нефункциональные требования. Система должна обрабатывать до 50 запросов одновременно без задержек, иметь интуитивно понятный интерфейс для пользователей с разным уровнем технической подготовки, быть гибкой для добавления новых курсов, данных и пользователей, а также функционировать в локальной сети автошколы.

Особое внимание уделяется защите данных, поскольку система работает с персональной информацией обучающихся и преподавателей. Основные требования безопасности включают аутентификацию пользователей через уникальные логины и пароли, разграничение прав доступа по ролям, хранение данных в зашифрованном виде и регулярное резервное копирование. Система также должна обеспечивать защиту от несанкционированного доступа и соответствовать требованиям законодательства РФ о защите персональных данных.

Одним из ключевых улучшений может стать внедрение централизованной базы данных, объединяющей информацию об учениках, сотрудниках и занятиях. Это позволит исключить дублирование данных и снизить вероятность ошибок при их передаче между сотрудниками автошколы. Менеджер по работе с клиентами сможет регистрировать учеников в системе, загружать их документы и автоматизировано формировать личные дела, что значительно ускорит процесс зачисления. Проверка документов также будет автоматизирована: система сможет анализировать предоставленные данные и уведомлять менеджера о недостающих или некорректных документах.

Процесс планирования занятий также претерпит изменения. В новой модели заведующий учебной частью

сможет формировать расписание в автоматизированном режиме, учитывая занятость преподавателей, инструкторов. Расписание занятий будет доступно преподавателям и инструкторам в системе, что исключит необходимость рассылки обновлений вручную.

Контроль посещаемости теоретических и практических занятий станет более удобным благодаря использованию электронных журналов. Преподаватели смогут фиксировать присутствие учеников непосредственно в системе. Это исключит дублирование информации и ускорит подготовку отчетов. Инструкторы также получат возможность отмечать посещаемость практических занятий через систему.

Еще одним важным элементом автоматизации станет учет успеваемости. В новой технологии выполнения процесса оценки за теоретические и практические занятия будут заноситься непосредственно в систему.

Помимо этого изменения коснутся и формирования отчетности. Подготовка отчетов требует значительных временных затрат, если информация собирается вручную из различных документов. В новой модели система автоматически будет формировать отчеты по посещаемости, успеваемости. Помимо этих отчетов будут добавлены следующие сводные отчеты за период: отчеты по загруженности сотрудников, отчеты о выпуске учеников из автошколы, отчеты по конверсии заявок. Это сократит время на подготовку документов и значительно минимизирует вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором.

Основываясь на анализе предметной области, были определены ключевые показатели, которые будут рассчитываться в информационной системе для эффективного управления автошколой [4].

Для эффективного анализа посещаемости занятий учениками необходимо определить процент посещаемости для конкретного ученика. Для оценки готовности учеников к экзамену в ГИБДД рассчитывается средневзвешенная успеваемость ученика, учитывая его оценки за теоретические и практические занятия с разными весами. Для анализа загруженности преподавателей/инструкторов автошколы важно учитывать коэффициент их загруженности. Для анализа выпуска учеников из автошколы ключевым показателем является процент учеников, успешно завершивших обучение. Для анализа эффективности обработки заявок в автошколе будет использоваться коэффициент конверсии заявок, который отражает эффективность процесса привлечения и обработки заявок в автошколе.

Грамотное техническое обеспечение необходимо для успешного внедрения и эксплуатации любой информационной системы [5]. При проектировании информационной системы необходимо учитывать инфраструктуру, в которой она будет функционировать после внедрения. В контексте разрабатываемой информационной системы ИТ-инфраструктура играет ключевую роль в обеспечении доступности, надежности и безопасности данных, а также для эффективного взаимодействия между пользователями и системой.

В рамках проектируемой системы была выбрана трехуровневая архитектура, включающая сервер базы данных, сервер приложений и клиентское рабочее место. Такой подход позволяет независимо масштабировать каждый компонент системы, что особенно важно при увеличении количества пользователей или объема обрабатываемых данных. Разделение системы на уровни повышает ее устойчивость к отказам. В случае сбоя на одном из них остальные продолжают функционировать [6].

Проведенное исследование выявило ключевые особенности проектирования информационной системы для поддержки организации обучения водителей в автошколе, а также основные сложности исполнения выбранного бизнес-процесса. Внедрение специализированной информационной системы позволит устранить недостатки, автоматизировать ключевые этапы процесса, повысить эффективность взаимодействия между сотрудниками автошколы и минимизировать вероятность ошибок.

Внедрение системы в реальных условиях автошколы позволит провести ее пилотное тестирование, оценить эффективность предложенной модели и выявить области для улучшения. Концепция может быть адаптирована для использования в других образовательных учреждениях с аналогичными внутренними процессами, что расширяет область применения разработанного решения. Система может быть дополнена новыми функциональными возможностями, такими как интеграция с внешними системами, управление финансовыми потоками автошколы.

Информационная система обеспечит переход от фрагментированного и трудоемкого процесса к централизованной и автоматизированной модели управления обучением водителей. Основными преимуществами новой технологии станут снижение административной нагрузки на сотрудников, повышение точности учета, ускорение обработки информации и улучшение контроля за образовательным процессом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баланов А.Н. Цифровизация в образовательной сфере: учебное пособие для вузов / А.Н. Баланов. — Санкт-Петербург: Лань, 2024. — 400 с.
2. CRM для автошколы? [Электронный ресурс]. — 2025. URL: <https://habr.com/ru/articles/883818/> (Дата обращения: 03.04.2025).
3. Требования к системам в мировой литературе [Электронный ресурс]. — 2024. URL: <https://habr.com/ru/articles/804349/> (Дата обращения: 03.04.2025).
4. Склад А.Я. Математическое обеспечение систем управления данными: учебное пособие / А.Я. Склад. — Москва: РТУ МИРЭА, 2023. — 76 с.
5. Голунова А.С. Программное и техническое обеспечение цифровых систем и технологий: учебное пособие / А.С. Голунова, Е.Г. Андреева, А.В. Голунов. — Омск: ОмГТУ, 2022. — 186 с.
6. Остроух А.В. Проектирование информационных систем: монография / А.В. Остроух, Н.Е. Суркова. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2021. — 164 с.

© Гантц Ирина Сергеевна (gantc@mirea.ru); Петрунин Максим Александрович (max2003255@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.06-2.07

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНОГО ГРАФИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МОДЕЛЕЙ В ЦЕЛОМ ПО МЕТОДОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ТРУДА

ALGORITHM FOR CONSTRUCTING THREE-DIMENSIONAL GRAPHICAL REPRESENTATION OF MODELS AS A WHOLE FOR METHODOLOGY OF AUTOMATION OF INTELLECTUAL LABOR

**M. Glinkin
O. Novoselova**

Summary. The article presents an algorithm for constructing a three-dimensional graphical representation of models of automated systems (AS) as a whole, based on the Methodology of Automation of Intellectual Labor (MAIL). The purpose of the study is to increase the efficiency of AS modeling through the formalization and visualization of their structure in a unified spatial representation, ensuring completeness of perception and coherence of components. Research methods: systems approach. The study analyzed the structures of models at different stages of design and introduced their algorithmization to enable automated visualization. As a result, an algorithm was developed that enables the construction of a comprehensive graphical representation of models, accounting for both static and dynamic aspects.

The proposed solution extends the tools for initial and conceptual modeling and provides a foundation for developing software tools to support visualization according to MAIL.

Keywords: methodology of automation of intellectual labor, modeling of automated systems, conceptual modeling, graphical notation, three-dimensional visualization.

Глинкин Максим Олегович

аспирант, Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»
maximglin05@yandex.ru

Новоселова Ольга Вячеславовна

Кандидат технических наук, доцент,
Московский государственный технологический
университет «СТАНКИН»
ol.novoselova@stankin.ru

Аннотация. В статье представлен алгоритм формирования трёхмерного графического представления моделей автоматизированных систем (АС) в целом на основе методологии автоматизации интеллектуального труда (МАИТ). Целью исследования является повышение эффективности моделирования АС за счёт формализации и визуализации их структуры в едином пространственном представлении, обеспечивающем полноту восприятия и согласованность компонентов. Методы исследования: системный подход. В исследовании проанализированы структуры моделей на разных этапах проектирования и выполнена их алгоритмизация с целью дальнейшей автоматизации процесса визуализации. В результате разработан алгоритм, позволяющий формировать комплексное графическое представление моделей, учитывающее как статические, так и динамические аспекты. Предложенное решение расширяет средства начального и концептуального моделирования и служит основой для разработки программных инструментов поддержки визуализации по МАИТ.

Ключевые слова: методология автоматизации интеллектуального труда, моделирование автоматизированных систем, концептуальное моделирование, графическая нотация, трехмерная визуализация.

В условиях стремительного развития информационных технологий и возрастающей сложности задач автоматизации, современные автоматизированные системы (АС) становятся все более масштабными и многоуровневыми. Это делает этап проектирования не просто важным, а ключевым в их жизненном цикле. Эффективность проектных решений во многом определяется тем, насколько глубоко специалист способен понять закономерности функционирования будущей системы. Однако на практике целостное представление об объекте проектирования часто оказывается фрагментированным: оно разрознено между различными документами — текстовыми, табличными, графическими, схематическими, спецификациями и пр. В результате комплексное представление о системе формируется

лишь в сознании разработчиков, что затрудняет взаимодействие, анализ и сопровождение проекта [1].

Особенно актуальной эта проблема становится в машиностроительной и инженерной отраслях, где создаваемые объекты по своей природе обладают высокой степенью интеграции и взаимозависимости между компонентами. Несмотря на прогресс в области средств автоматизации проектирования и значительные вычислительные ресурсы, существующие подходы по-прежнему сталкиваются с ограничениями, связанными с необходимостью согласования большого объема информации и интеграции разнородных представлений модели в единое целое.

Во многих современных методологиях моделирования АС принято разделять модель на ряд структурных компонент — поведенческих, описывающих функциональность и процессы; информационных, фиксирующих статические элементы; а также вспомогательных, отражающих особенности конкретной предметной области. Для визуализации таких структур традиционно применяются двумерные графические нотации, каждая из которых соответствует отдельному аспекту модели. Однако подобный подход часто оказывается недостаточным для формирования интуитивно понятного представления модели в целом, особенно если речь идет о визуализации связей между различными структурами или уровнями абстракции.

В этой связи трехмерная визуализация моделей представляет собой перспективный инструмент, позволяющий повысить наглядность, расширить возможности анализа и облегчить восприятие сложных взаимосвязей. Особенно актуально это в рамках методологии автоматизации интеллектуального труда (МАИТ), в которой моделирование охватывает как статические, так и динамические аспекты предметной области. Иерархическая структура обеих компонент модели, а также явное отображение зависимостей между ними, создают основу для формального анализа, параллельной обработки, интеграции моделей и других аналитических интеллектуальных операций. Визуальное представление этих связей в трехмерной форме снижает когнитивную нагрузку на специалистов и способствует более эффективному моделированию, анализу и сопровождению систем в соответствии с принципами МАИТ.

Формирование целостного трехмерного графического представления моделей, соответствующих принципам методологии автоматизации интеллектуального труда, невозможно без четко определенного алгоритмического механизма, опирающегося на формальные основания. В рамках предыдущих исследований была заложена теоретическая база, необходимая для такой алгоритмизации. В частности, в [2] было представлено формальное описание графической нотации, в которой каждому элементу модели по МАИТ ставится в соответствие структурный элемент графа визуального представления. Это описание обеспечило строгое отображение элементов статической и динамической структур на элементы трехмерной модели, с сохранением их семантики и взаимосвязей.

Дальнейшее развитие подхода получило в работе [3], где были подробно изложены правила построения визуальных представлений: определены правила именования сущностей, структура обозначений, визуальные значки и принципы расположения компонентов в пространстве. Тем самым было создано нормативное описание визуального языка, позволяющего специали-

стам однозначно интерпретировать визуальную модель, соответствующую формальной структуре исходной информационно-модели системы.

Тем не менее, применение указанной нотации на практике требует дальнейшей формализации процесса визуализации — в частности, необходимо определить точный порядок действий, обеспечивающих преобразование исходной модели в трехмерную визуальную форму. Это включает выбор последовательности обхода структур, разрешение иерархий, установление пространственных координат и отображение связей, включая их направленность, тип и семантику. Соответственно, возникает необходимость в разработке алгоритма построения трехмерного графического представления модели, способного автоматически интерпретировать ее формальные компоненты и обеспечивать целостную визуализацию, согласованную с методологией МАИТ и правилами, изложенными в [2, 3].

На первом этапе алгоритма (см. рис. 1) реализуется итеративный обход множества моделей автоматизированных систем (АС), формируемых в рамках различных предметных задач [4]. Такая организация процесса необходима для обеспечения универсальности алгоритма и его применимости в случаях, когда проектирование охватывает сразу несколько моделей, связанных общей методологической основой. На каждой итерации происходит фиксация текущей (i-й) модели (блок z3.1), после чего выполняется формирование соответствующего графического представления модели АС в целом по МАИТ для всех этапов моделирования (z3.2). Результаты визуализации могут фиксироваться в зависимости от наличия предварительно сформированных моделей (z3.3). При этом алгоритм различает два случая: при наличии уже существующей модели (ветвь z4.2) и при ее отсутствии (ветвь z4.3), что позволяет обеспечить как инкрементальную актуализацию визуального представления, так и его формирование «с нуля». Такая структура обеспечивает расширяемость алгоритма и его адаптацию к многомодельным сценариям проектирования.

На следующем уровне детализации (см. рис. 2) осуществляется итеративная обработка для этапов моделирования в рамках текущей модели АС. Методология МАИТ предполагает разделение моделирования на ряд последовательно уточняемых этапов, таких как предпроектный (начальный) и концептуальный. На каждой итерации фиксируется j-й этап моделирования (z5.1), после чего формируется графическое представление модели АС в целом для данного этапа (z5.2). В зависимости от наличия последующих этапов визуализация либо уточняется (z6.6), либо фиксируется как итоговая для данного уровня (z6.7), что позволяет сохранять логическую связность между фазами моделирования и обеспечивает полноту отображения модели в процессе ее поэтапного развития.

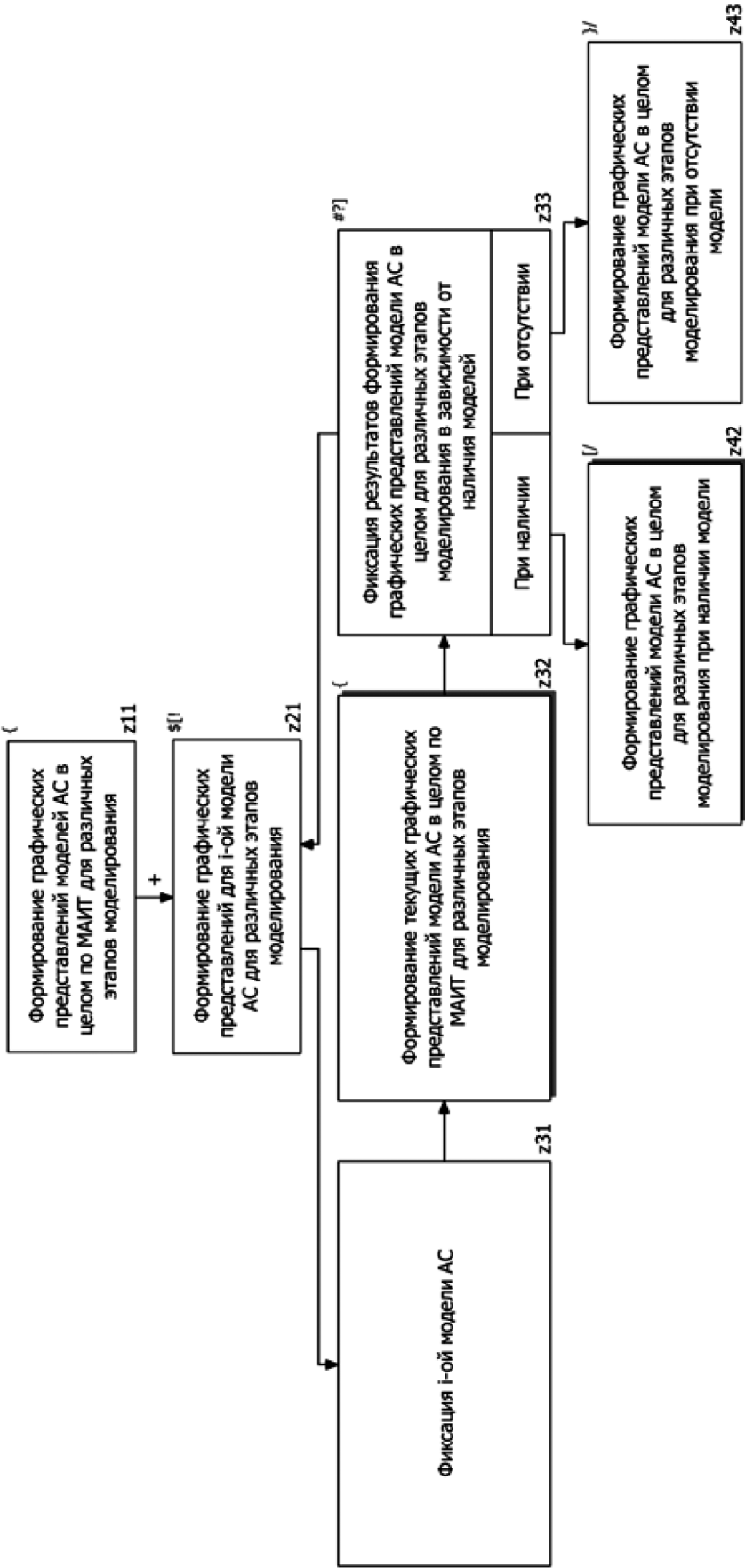


Рис. 1. Действие z1.1 алгоритма

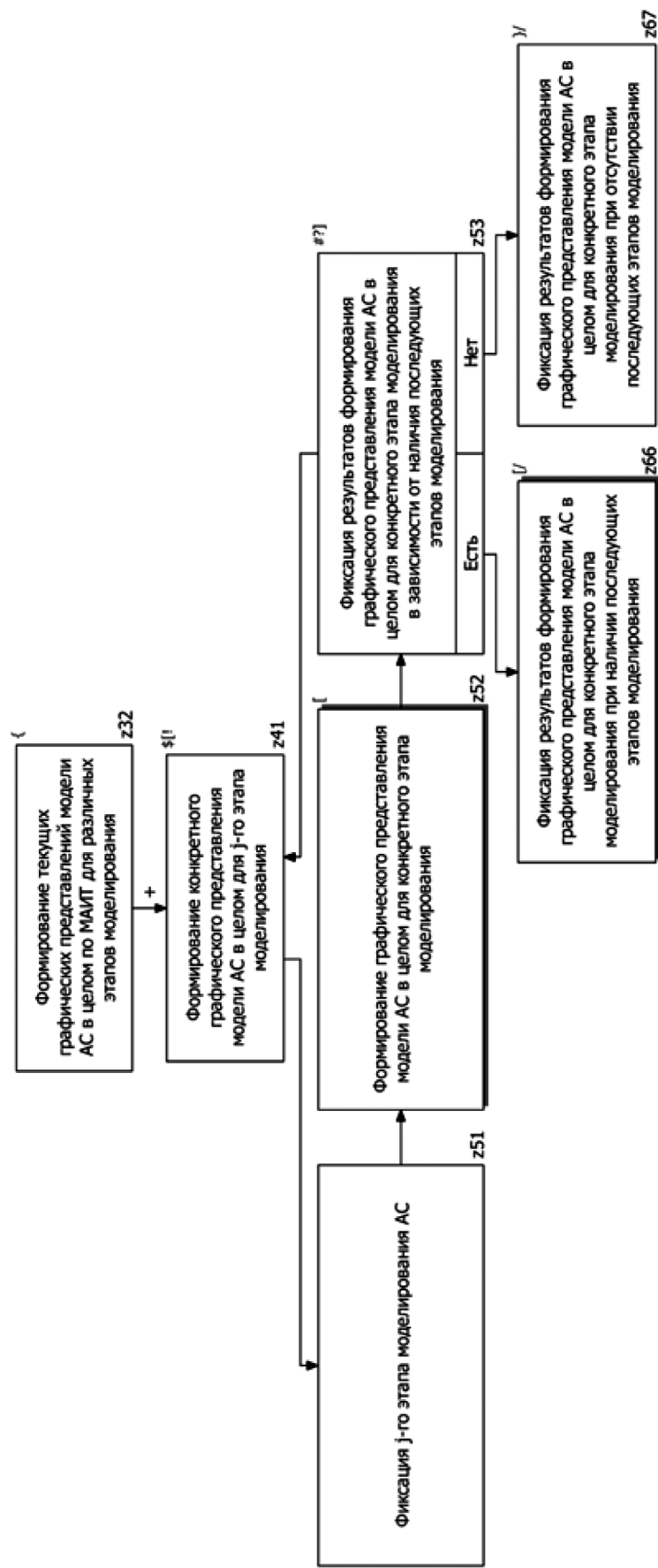


Рис. 2. Действие z3.2 алгоритма

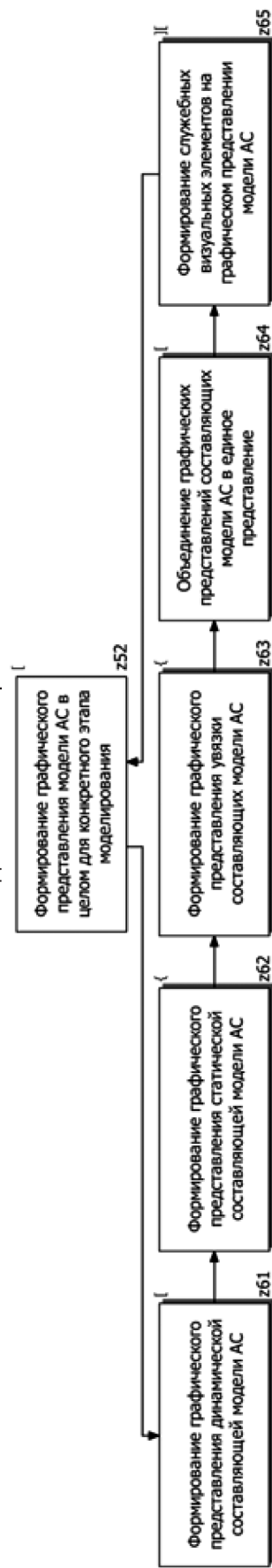


Рис. 3. Действие z5.2 алгоритма

Формирование графического представления модели АС для конкретного этапа моделирования осуществляется через поэтапную сборку ее ключевых составляющих (см. рис. 3). Вначале последовательно формируются визуальные проекции динамической (z6.1) и статической (z6.2) компонент модели, после чего выполняется отображение связей между ними (z6.3). Полученные представления объединяются в единое визуальное пространство (z6.4), что позволяет отразить взаимосвязь всех аспектов модели. Завершается процесс добавлением служебных визуальных элементов (z6.5), обеспечивающих читаемость, навигацию и корректную интерпретацию структуры в трехмерной среде.

Формирование графического представления динамической составляющей модели начинается с инициализации обхода ее структур (см. рис. 4). Для этого первый узел (соответствующий начальному предметному действию или зависимости с индексом 1.1) помещается в стек Sdyn (z7.1), обеспечивающий контроль над порядком обхода в иерархической древовидной структуре. Дан-

ный подход позволяет реализовать рекурсивную стратегию обхода без использования вложенных вызовов.

Далее осуществляется поочередная обработка узлов динамической структуры (z7.2–z9.3 на рис. 5). Каждый узел извлекается из вершины стека и фиксируется (z9.1), после чего проводится его обработка и определяются действия по продолжению обхода (z9.2). В зависимости от наличия дополнительных узлов в стеке, алгоритм либо продолжает обработку следующего элемента (z10.6), либо завершает обход, если структура исчерпана (z10.7).

Обработка текущего узла динамической структуры модели (z9.2) включает ряд последовательных операций, направленных на корректное отображение его в графическом представлении (см. рис. 6). Сначала вычисляются координаты позиции блока, соответствующего данному узлу (z10.1), на основе его порядкового номера и параметров размера и отступов (z11.1, z11.2). После этого осуществляется позиционирование блока в пространстве визуализации (z10.2).

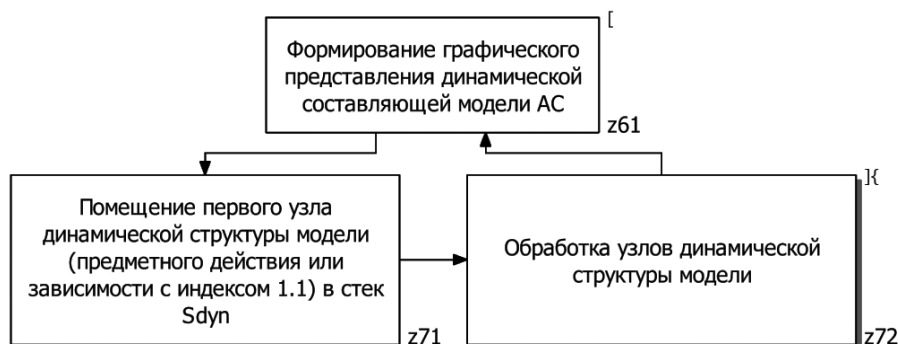


Рис. 4. Действие z6.1 алгоритма

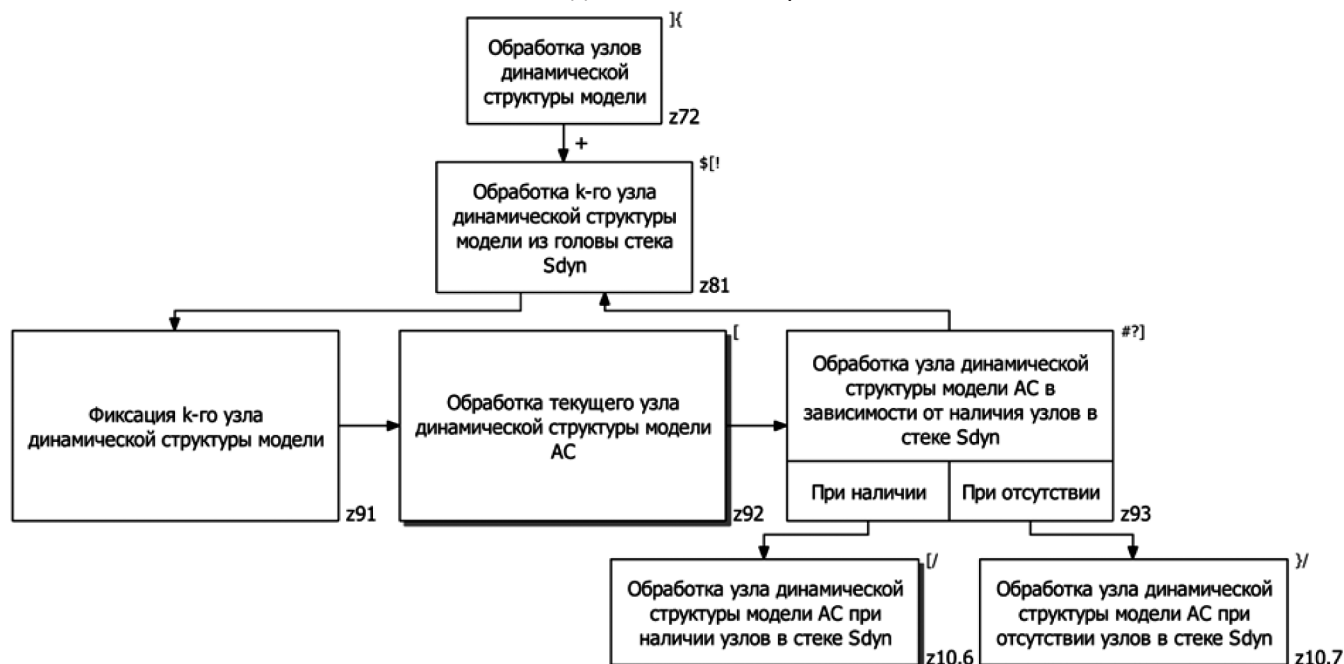


Рис. 5. Действие z7.2 алгоритма

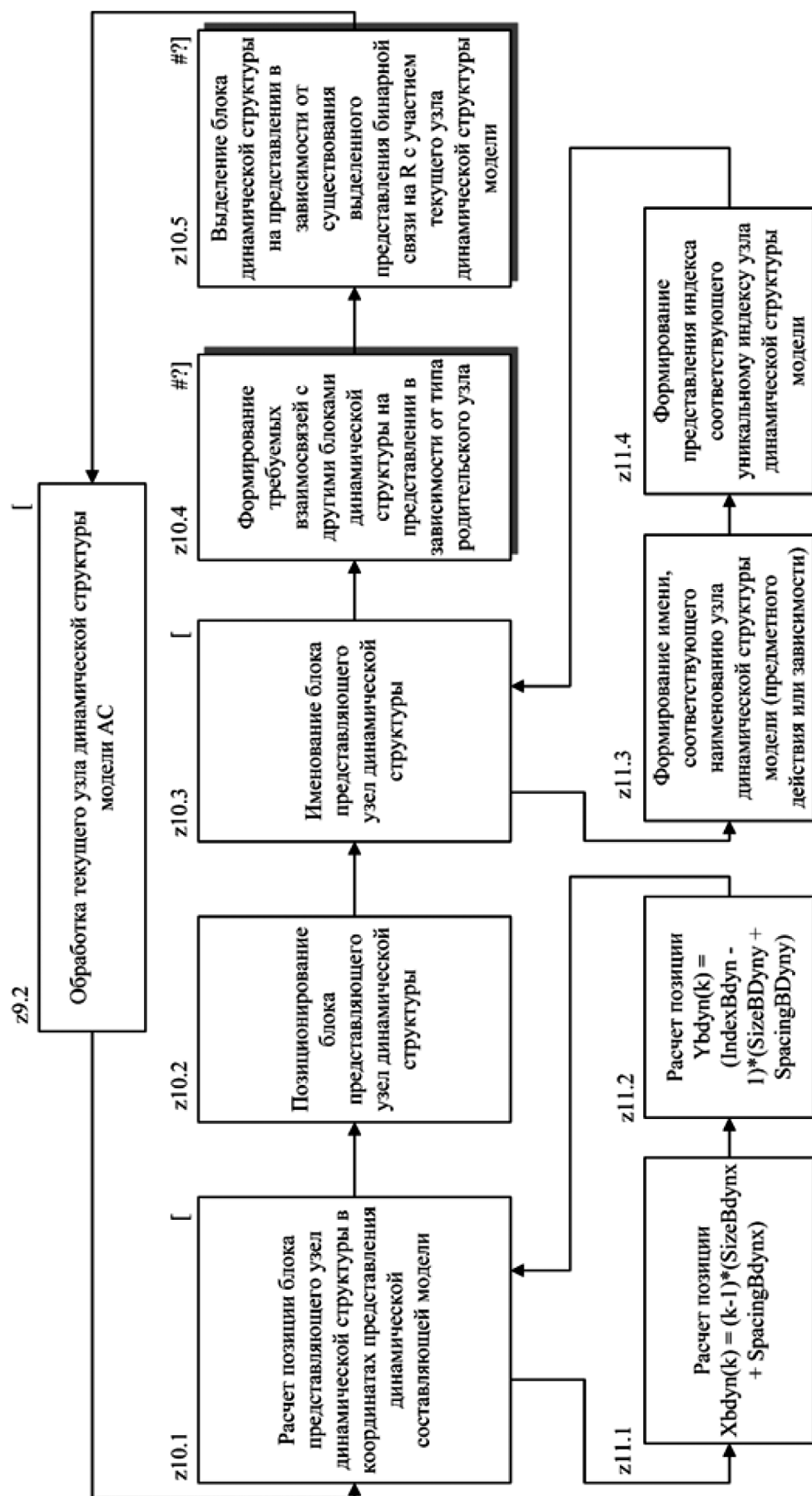


Рис. 6. Действие z9.2 алгоритма

Следующим шагом является генерация текстовой метки — имени, отражающего семантику соответствующего действия или зависимости (z10.3), с учетом структурных наименований в модели (z11.3), а также формирование отображаемого индекса узла (z11.4). После позиционирования и именования узла формируются необходимые связи с другими блоками динамической структуры (z10.4), включая отображение бинарных отношений, если они заданы в модели (z10.5). Эти связи формируются в зависимости от типа родительского узла и наличия бинарной связи на множестве отношений R, обеспечивая логическое единство и семантическую согласованность визуализируемой структуры.

Формирование взаимосвязей между блоками динамической структуры на графическом представлении осуществляется в зависимости от типа родительского узла. Для узлов, организованных в последовательность, тип связи уточняется в зависимости от положения элемента — первого, среднего или последнего, что обеспечивает корректное отображение логики исполнения. В случае первого элемента формируются стрелки к родительскому блоку и следующему элементу, для среднего — к предыдущему и следующему, а для последнего — к предыдущему и родительскому. Для структур типа «Цикл» и «Альтернатива» создаются прямые связи между дочерними и родительскими блоками.

Формирование графического представления статической составляющей модели (z6.2) организовано в виде вложенного итерационного процесса (см. рис. 7). На внешнем уровне осуществляется обход по типам предметных категорий (z7.3–z8.4), таких как «Объект»,

«Компонент», «Задача», «Процесс», «Цикл». Для каждого типа фиксируются и обрабатываются соответствующие узлы (z8.2–z8.3), с учетом возможного отсутствия или наличия экземпляров данного типа в модели (z8.4–z9.6).

На внутреннем уровне (см. рис. 8) обрабатываются конкретные предметные категории внутри текущего типа (z9.4–z10.10). Каждый узел фиксируется (z10.8), визуализируется с учетом своих свойств и иерархии (z10.9), а также проверяется на наличие дополнительных подкатегорий. Это позволяет гибко формировать структуру модели с учетом разнообразия категорий и обеспечивать корректную привязку визуальных элементов в пространстве трехмерного представления.

Обработка текущего узла статической структуры модели (z10.9) включает выполнение набора операций, направленных на формирование его визуального представления в соответствии с семантикой предметной категории (см. рис. 9). Сначала определяется внешний вид блока на основе типа узла (z11.12), затем рассчитывается его позиция на представлении (z11.13) и осуществляется пространственное размещение (z11.14). Далее выполняется именование блока (z11.15) и формируются связи с другими элементами статической структуры, если это предусмотрено моделью (z11.16). На завершающем этапе производится проверка на наличие бинарных связей с участием текущего узла; при наличии таких связей отображаются дополнительные визуальные элементы, подчеркивающие семантические отношения в модели (z11.17). Эта последовательность обеспечивает корректную и однозначную визуализацию статической составляющей модели АС на трехмерном представлении.



Рис. 7. Действие z62 алгоритма

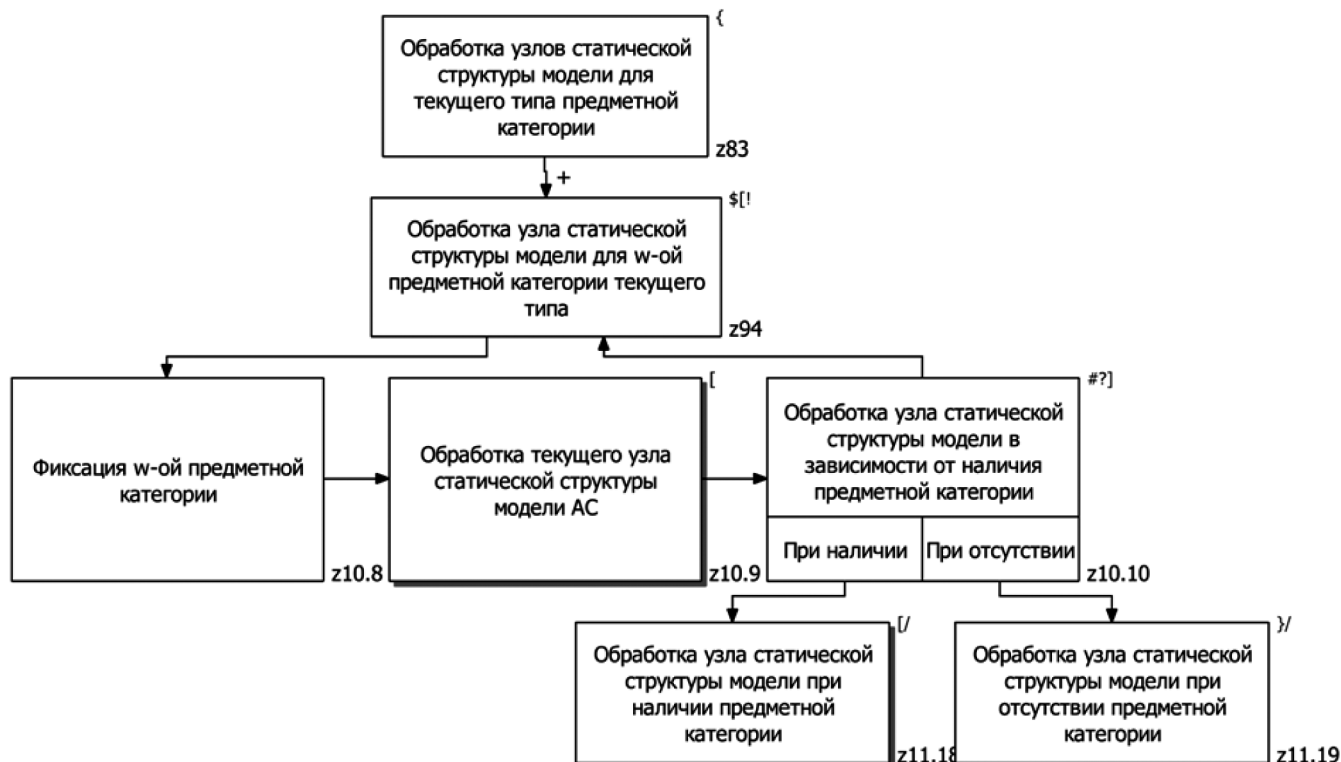


Рис. 8. Действие z83 алгоритма

Расчет координат позиционирования блока, соответствующего узлу статической структуры модели (z11.13), осуществляется с учетом типа предметной категории и ее положения в иерархии (см. рис. 10).

Значение координаты Y вычисляется в зависимости от порядкового номера категории q (z12.7), а координата X определяется различными способами в зависимости от типа категории: для типа «Объект» (z13.7) применяется расчет на основе номера родительского узла и относительного смещения (z14.1–z14.3), в то время как для остальных типов («Компонент», «Задача», «Процесс», «Цикл») (z13.8) координата X рассчитывается как среднее значение между позициями крайних дочерних категорий (z14.4–z14.6).

Формирование взаимосвязей между блоками статической структуры модели (z11.16) осуществляется дифференцированно в зависимости от типа предметной категории (см. рис. 11). Для элементов категории «Объект» построение связей не требуется (z12.10), тогда как для остальных типов (например, «Компонент», «Задача», «Процесс», «Цикл») реализуется генерация связей с дочерними категориями (z12.11). Обработка включает фиксацию текущей категории нижележащего уровня (z14.11), построение связей между соответствующими блоками (z14.12–z15.3), а также фиксацию результата с учетом наличия или отсутствия соответствующего элемента (z14.13–z15.4). Такой подход позволяет отразить в визуальной структуре иерархические и логические от-

ношения между категориями, обеспечивая согласованность трёхмерного представления модели со структурными требованиями МАИТ.

Формирование графического представления увязки составляющих модели АС (z6.3) реализуется в два этапа: сначала выполняется обход узлов динамической структуры модели, затем — элементов статической структуры, в частности категорий типа «Объект». Для каждого узла фиксируется его идентификатор, после чего формируется соответствующее визуальное отображение увязки с другими компонентами модели. Результаты визуализации зависят от наличия данных по взаимосвязи: в случае их присутствия строятся соответствующие связи, при отсутствии — визуализация корректно завершается без отображения дополнительной информации. Такая организация обеспечивает согласованность между компонентами модели и завершает построение целостного визуального образа системы.

На завершающем этапе формирования графического представления увязки составляющих модели (z10.14) осуществляется отображение взаимосвязей между элементами динамической и статической структур. Для каждой пары узлов (z, v), где z — узел динамической структуры, а v — узел категории типа «Объект», рассчитываются координаты взаимосвязи (z11.20–z12.17). Если в множестве R зафиксировано бинарное отношение между данной парой, формируется визуальное представление соответствующего типа связи (z11.21–z13.16).

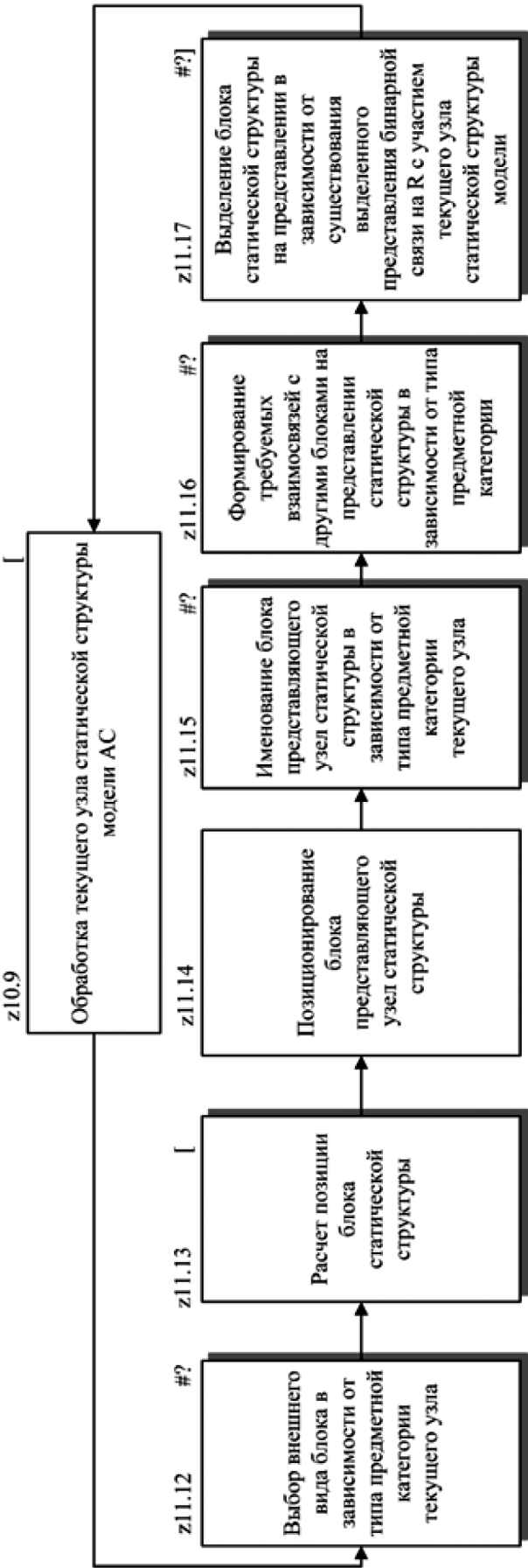


Рис. 9. Действие z10.9 алгоритма

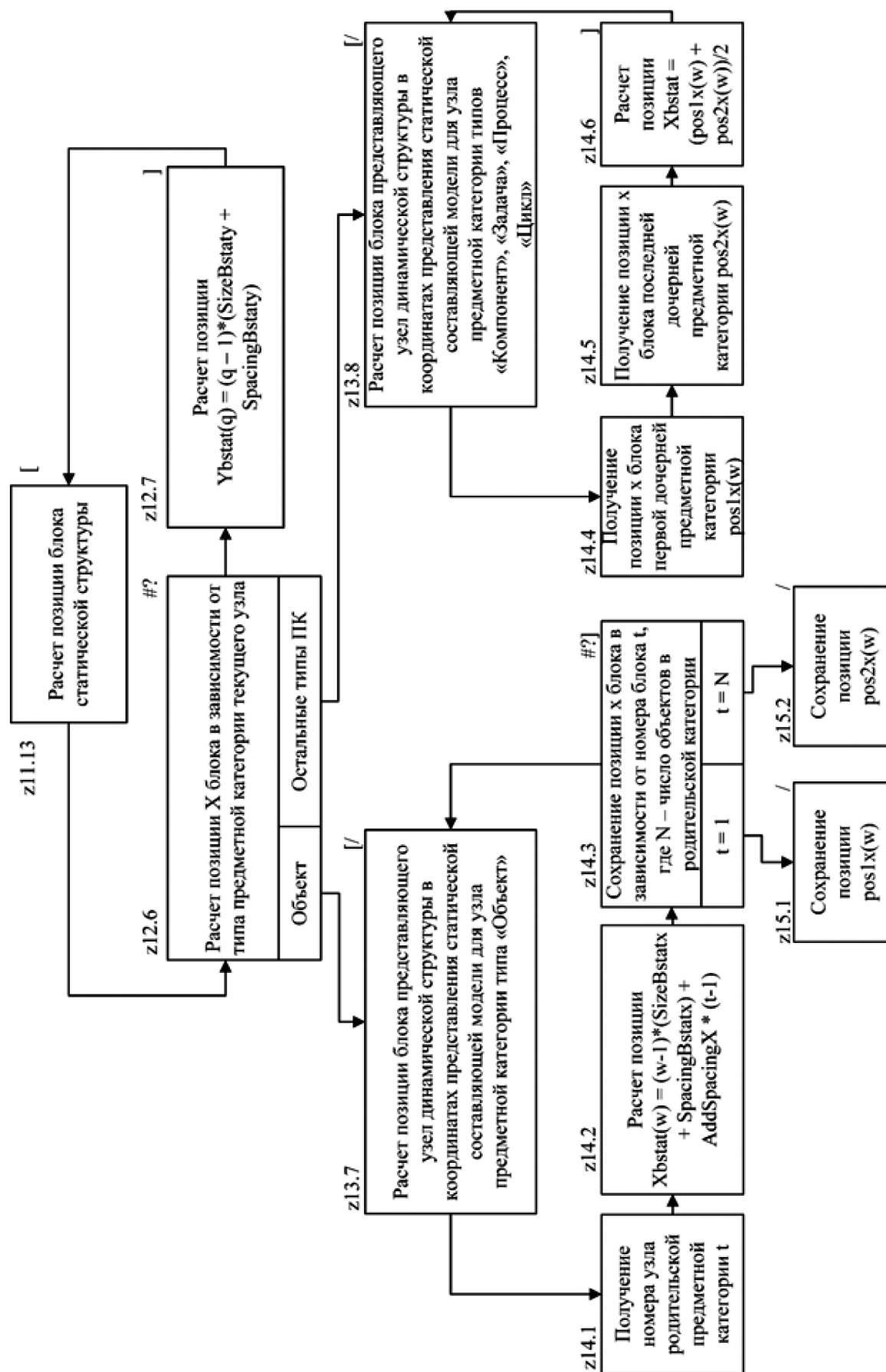


Рис. 10. Действие z11.13 алгоритма

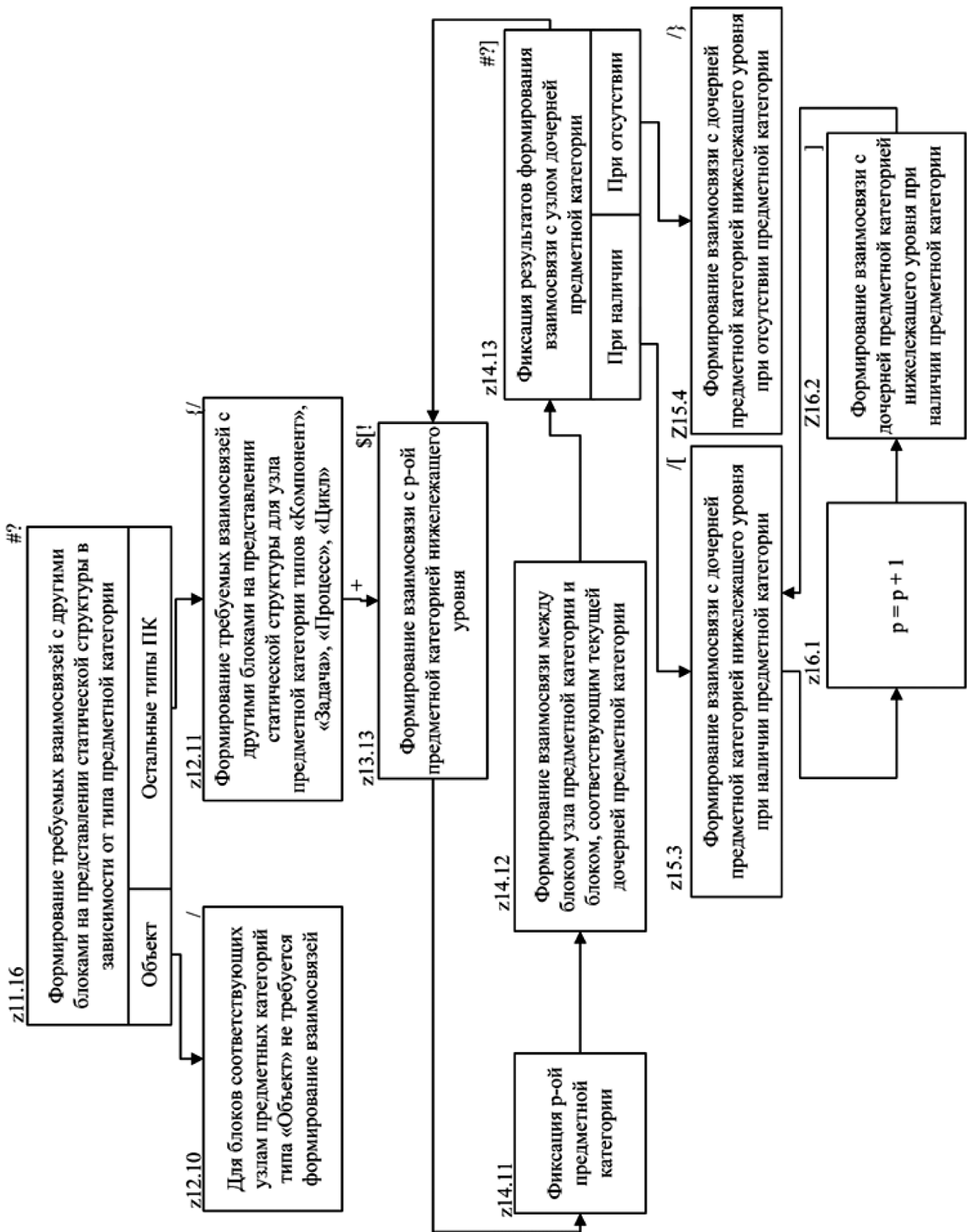


Рис. 11. Действие z11.16 алгоритма

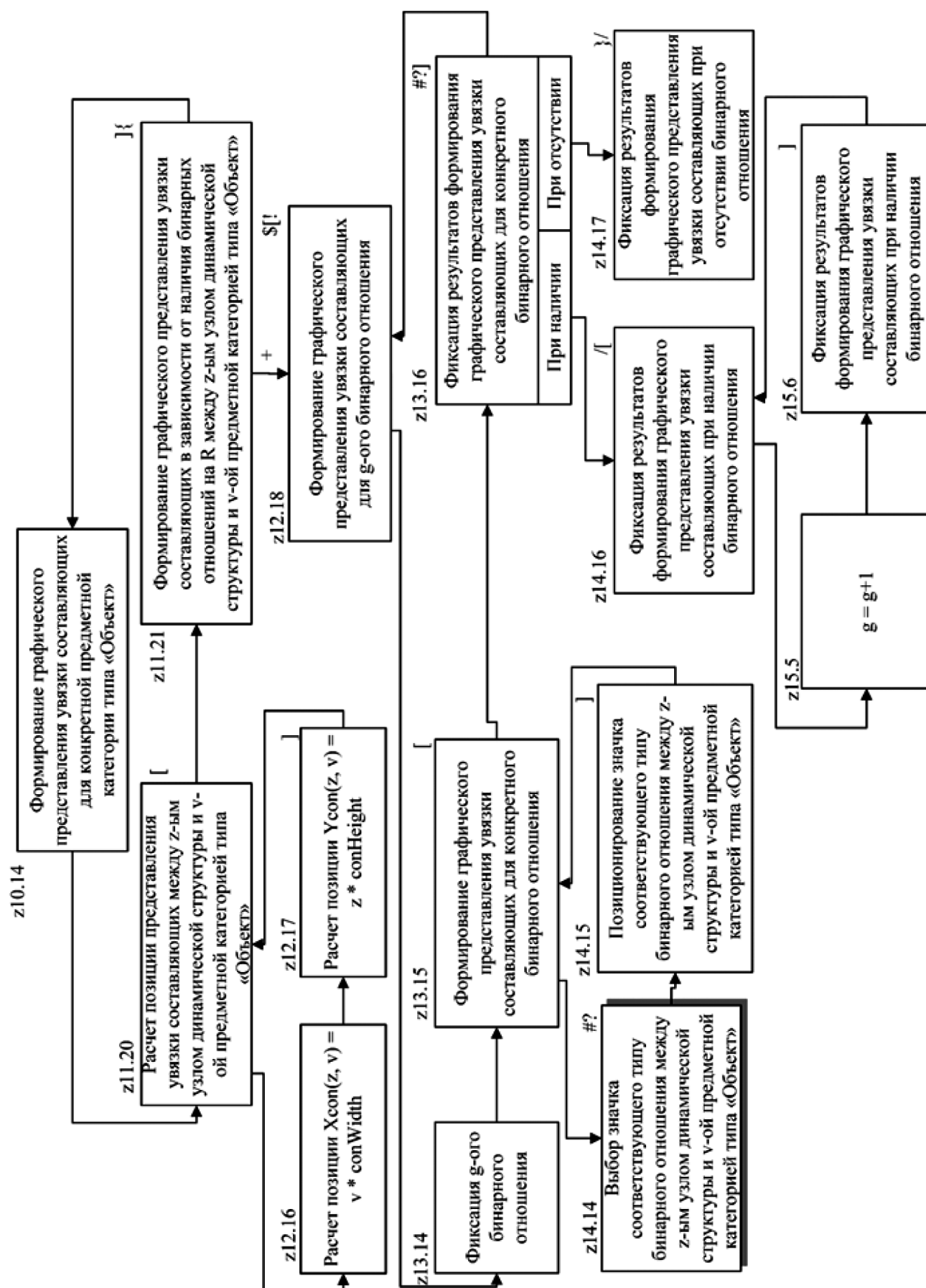


Рис. 12. Действие z10.14 алгоритма

При этом подбирается графический значок, отражающий класс взаимосвязи (z14.14), и он позиционируется на диаграмме (z14.15). В случае отсутствия отношения визуализация завершается без отображения элемента (z14.17). Такой подход обеспечивает семантическую полноту трёхмерной визуализации модели и делает явной структуру логических соответствий между действиями и информационными сущностями (см. рис. 12).

Далее осуществляется объединение всех графических представлений составляющих модели АС в единое трёхмерное пространство (z6.4). Для этого каждое из представлений — динамической структуры (z7.5), статической структуры (z7.6) и множества межструктурных связей (z7.7) — поворачивается и размещается в соответствующей координатной плоскости (zy, xy, zx), обеспечивая их пространственное разделение и визуальную читаемость (см. рис. 13).

Далее формируются служебные визуальные элементы (z6.5), включая координатные оси Ox, Oy, Oz (z8.8–z8.10) и сетку, упрощающую визуальное разграничение взаимосвязей между компонентами модели (z7.9). Эти

элементы завершают построение визуальной сцены и обеспечивают её структурированность, удобную для восприятия и анализа специалистом (см. рис. 14).

Разработанный алгоритм формирования трёхмерного графического представления моделей автоматизированных систем обеспечивает целостную визуализацию их структуры в соответствии с принципами методологии автоматизации интеллектуального труда. Предложенный подход учитывает особенности начального и концептуального этапов моделирования, включая обработку динамической и статической составляющих, а также их взаимосвязей. Реализация алгоритма позволяет формализовать процесс построения визуального образа модели, повысить наглядность представления, снизить когнитивную нагрузку на специалистов и обеспечить согласованность между этапами моделирования. Результаты работы могут быть использованы в качестве основы для создания программных средств поддержки моделирования по МАИТ и дальнейшего развития интеллектуальных средств автоматизации проектной деятельности.

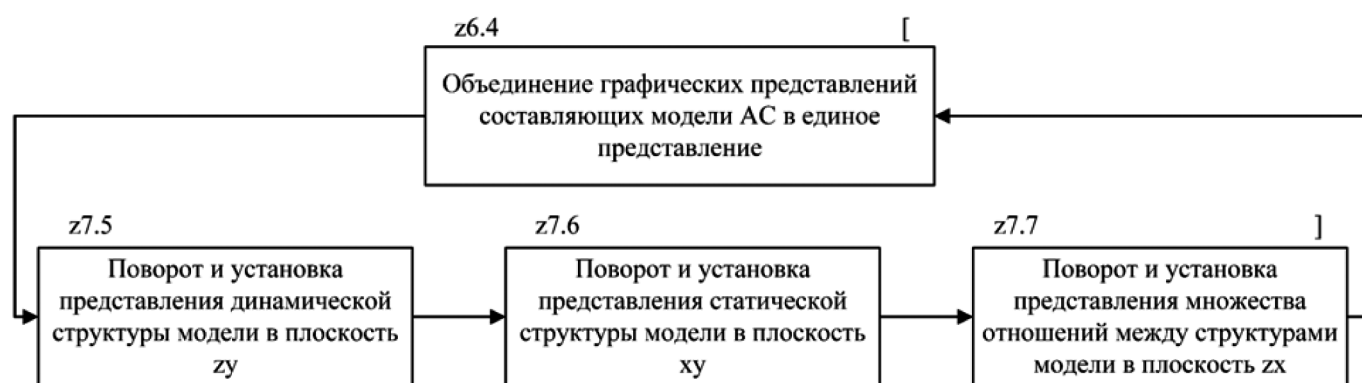


Рис. 13. Действие z6.4 алгоритма

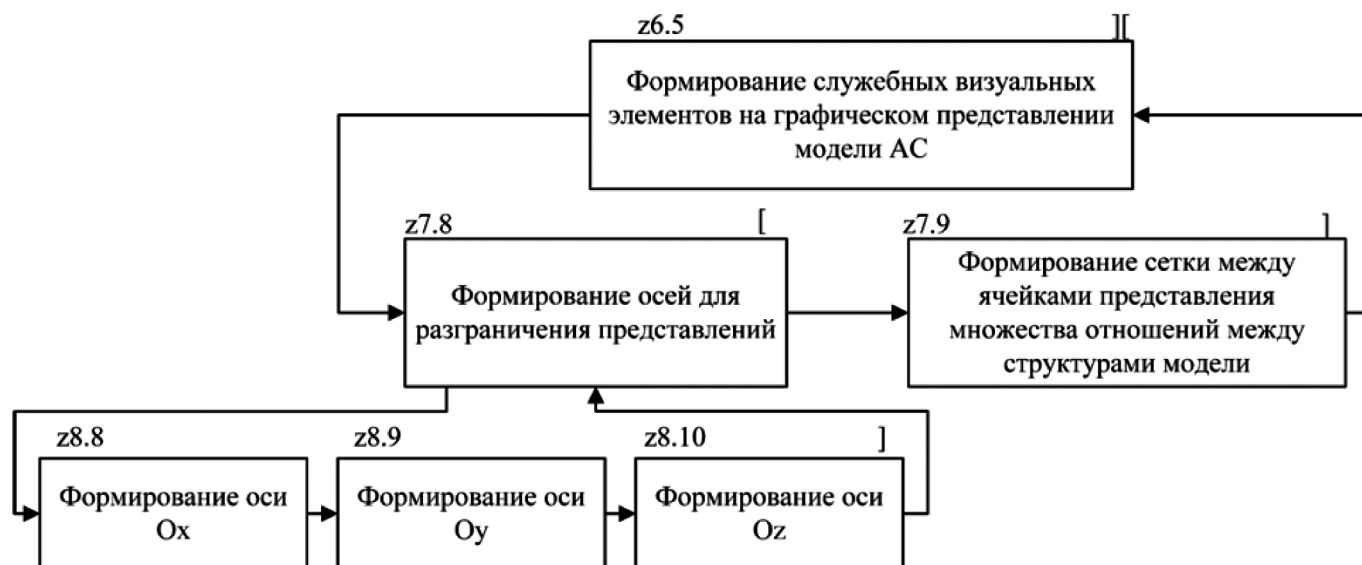


Рис. 14. Действие z6.5 алгоритма

ЛИТЕРАТУРА

1. Волкова Г.Д. Теория и практика автоматизации интеллектуального труда. / Волкова Г.Д. — М.: Янус-К, 2020. — 104 с. — ISBN 978-5-8037-0805-6
2. Глинкин М.О. Формальное описание графической нотации для представления моделей в целом по методологии автоматизации интеллектуального труда / М.О. Глинкин, О.В. Новоселова // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2024. — № 6–2. — С. 92–96. — DOI 10.37882/2223–2966.2024.6–2.12. — EDN SQWXJC.
3. Глинкин М.О. Разработка графической нотации для представления моделей в целом по методологии автоматизации интеллектуального труда / М.О. Глинкин, О.В. Новоселова // Инженерный вестник Дона. — 2024. — № 5(113). — С. 756–770. — EDN JRTMXG.
4. Новоселова О.В. Моделирование предметных задач на начальных этапах автоматизации проектной деятельности: учеб. пособие / О.В. Новоселова. — М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2016. — 100 с.: ил. ISBN 978-5-7028-0598-6

© Глинкин Максим Олегович (maximglin05@yandex.ru); Новоселова Ольга Вячеславовна (ol.novoselova@stankin.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ПОДДЕРЖКИ ВИЗУАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МОДЕЛЕЙ В ЦЕЛОМ ПО МЕТОДОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ТРУДА В ИНТЕГРИРОВАННОЙ СРЕДЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

DEVELOPMENT OF VISUALIZATION SUPPORT TOOLS FOR HOLISTIC MODEL REPRESENTATION BASED ON THE METHODOLOGY OF AUTOMATION OF INTELLECTUAL LABOR IN AN INTEGRATED DESIGN ENVIRONMENT

M. Glinkin

Summary. The article presents the implementation of a software module for supporting the visualization of holistic models of automated systems, developed in accordance with the Methodology of Automation of Intellectual Labor (MAIL), within an integrated visual design environment. The aim of the study is to increase the efficiency of system modeling by creating a comprehensive and visually clear three-dimensional representation that ensures structural readability and cognitive accessibility. Research method: systems approach. The study considers the structural components of MAIL-based models and addresses key aspects of high-quality diagram visualization, including accuracy, legibility, and consistency of scene elements. As a result, tools were developed to support the generation of three-dimensional representations of holistic models based on MAIL, which helped reduce the time required for their analysis and verification.

Keywords: Methodology of Automation of Intellectual Labor, modeling of automated systems, conceptual modeling, graphical notation, three-dimensional visualization.

Глинкин Максим Олегович

аспирант, Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»
maximglin05@yandex.ru

Аннотация. В статье представлена реализация программного модуля поддержки визуального представления моделей автоматизированных систем в целом, формируемых по методологии автоматизации интеллектуального труда (МАИТ), в составе визуальной интегрированной среды проектирования. Целью исследования является повышение эффективности моделирования за счёт создания целостного и наглядного трёхмерного образа модели, обеспечивающего её структурную читаемость и когнитивную доступность. Методы исследования: системный подход. В исследовании рассмотрены структурные компоненты моделей по МАИТ, а также аспекты обеспечения качественной визуализации диаграмм, включая точность, читаемость и согласованность элементов сцены. В результате разработаны средства поддержки формирования трёхмерного представления моделей в целом по МАИТ, что позволило сократить затраты времени на их анализ и проверку.

Ключевые слова: методология автоматизации интеллектуального труда, моделирование автоматизированных систем, концептуальное моделирование, графическая нотация, трёхмерная визуализация.

Развитие методов проектирования автоматизированных систем (АС) сопровождается возрастающей потребностью в формализованных подходах к представлению, анализу и согласованию моделей, разрабатываемых на ранних этапах жизненного цикла. Наибольшую значимость в этом контексте приобретают начальный и концептуальный этапы моделирования, где формируется обобщённое представление об объекте проектирования, определяются ключевые функции, информационные потоки и связи между элементами будущей системы.

В качестве методологической основы для описания моделей АС в данной работе используется методология

автоматизации интеллектуального труда (МАИТ), зарекомендовавшая себя как универсальный подход к формализации знаний о предметной области и действиях, производимых в ней. МАИТ предполагает представление модели в виде совокупности взаимосвязанных статических и динамических структур, дополненных формализованными отношениями между ними. Такая структура обеспечивает высокую степень выразительности и позволяет проводить дальнейшую трансформацию моделей, анализ их согласованности и верификацию.

Однако практическое применение моделей, формируемых по МАИТ, требует адекватных инструментов поддержки [1] — как с точки зрения технической реализа-

ции, так и в аспекте визуального восприятия. Учитывая многокомпонентную природу моделей и их иерархическую организацию, важно обеспечить визуализацию, позволяющую охватить всю модель в целом, отразить взаимосвязи между уровнями и минимизировать когнитивную нагрузку на пользователя.

В данной статье рассматривается разработка и реализация средств поддержки визуализации моделей автоматизированных систем в составе визуальной интегрированной среды проектирования. Основное внимание уделяется архитектуре программного решения, особенностям представления моделей по МАИТ в виде трёхмерных диаграмм, а также вопросам интеграции и использования разработанного модуля в рамках уже существующей среды проектирования «ИС-2». Целью работы является повышение эффективности моделирования за счёт создания целостного, согласованного и когнитивно-доступного визуального образа модели на базе методологии МАИТ.

Модели автоматизированных систем, формируемые в соответствии с методологией автоматизации интеллектуального труда (МАИТ), представляют собой совокупность иерархически организованных структур. В рамках данной методологии выделяются две ключевые составляющие:

- динамическая структура, описывающая систему предметных действий и зависимостей;
- статическая структура, представляющая предметные категории и их взаимосвязи.

Кроме того, существенную роль играют отношения между этими структурами, отражающие зависимости между действиями и используемой или изменяемой информацией. Формальная организация этих компонентов позволяет описывать поведение и состояние проектируемой системы в терминах процессов, объектов и логических связей, поддающихся последующей трансформации и анализу [2].

Для эффективного применения моделей по МАИТ на практике требуется визуальное представление, обеспечивающее:

- соответствие визуальных элементов структурам модели и их семантике;
- наглядное отображение взаимосвязей между элементами разных структур;
- возможность восприятия модели как целостного объекта анализа.

В условиях высокой сложности создаваемых моделей двумерные диаграммы оказываются ограниченными в плане отображения взаимосвязей между компонентами и уровней вложенности. Это затрудняет системный анализ и проверку согласованности модели.

В связи с этим возникает необходимость построения трёхмерного визуального представления модели, в котором каждая из структур (статическая, динамическая, связующая) отображается в отдельной координатной плоскости, а связи между ними реализуются в пространственном контексте.

Таким образом, формализация задачи сводится к построению согласованной визуальной сцены, в которой все элементы модели, сформированной по МАИТ, представлены в трёхмерном виде с сохранением структурной и семантической целостности. При этом задача включает определение правил отображения компонентов, алгоритмов их позиционирования и визуальных связей, которые были описаны в предыдущих статьях [3, 4], а также методов интеграции полученного представления в существующую проектную среду.

В соответствии с поставленной задачей была разработана программная реализация средств поддержки визуализации моделей, формируемых по методологии автоматизации интеллектуального труда (МАИТ), в составе интегрированной среды проектирования. Архитектура решения построена по модульному принципу, что обеспечивает независимость визуализатора от внутренних механизмов базовой среды и упрощает расширение или повторное использование компонентов (см. рис. 1).

Программная реализация включает два ключевых компонента:

- модуль среды «ИС-2», предназначенный для формирования модели на основе пользовательского ввода в терминах МАИТ;
- визуализатор, реализующий отображение модели в трёхмерном графическом виде.

Основные функции визуализатора включают:

- отображение динамической структуры модели в виде ориентированного графа действий/зависимостей;
- отображение статической структуры как отдельной иерархии предметных категорий;
- построение межструктурных связей, связывающих действия с соответствующими информационными элементами;
- реализацию пользовательского взаимодействия: масштабирование, поворот сцены, выбор элементов, отображение меток и значков взаимосвязей.

Расположение компонентов на трёхмерной сцене реализуется согласно ранее разработанным алгоритмам [3, 4]. Каждая структура отображается в собственной координатной плоскости, при этом сохраняется визуальная целостность за счёт правил привязки и автоматического позиционирования. Использование единого формата передачи модели позволяет легко синхронизировать

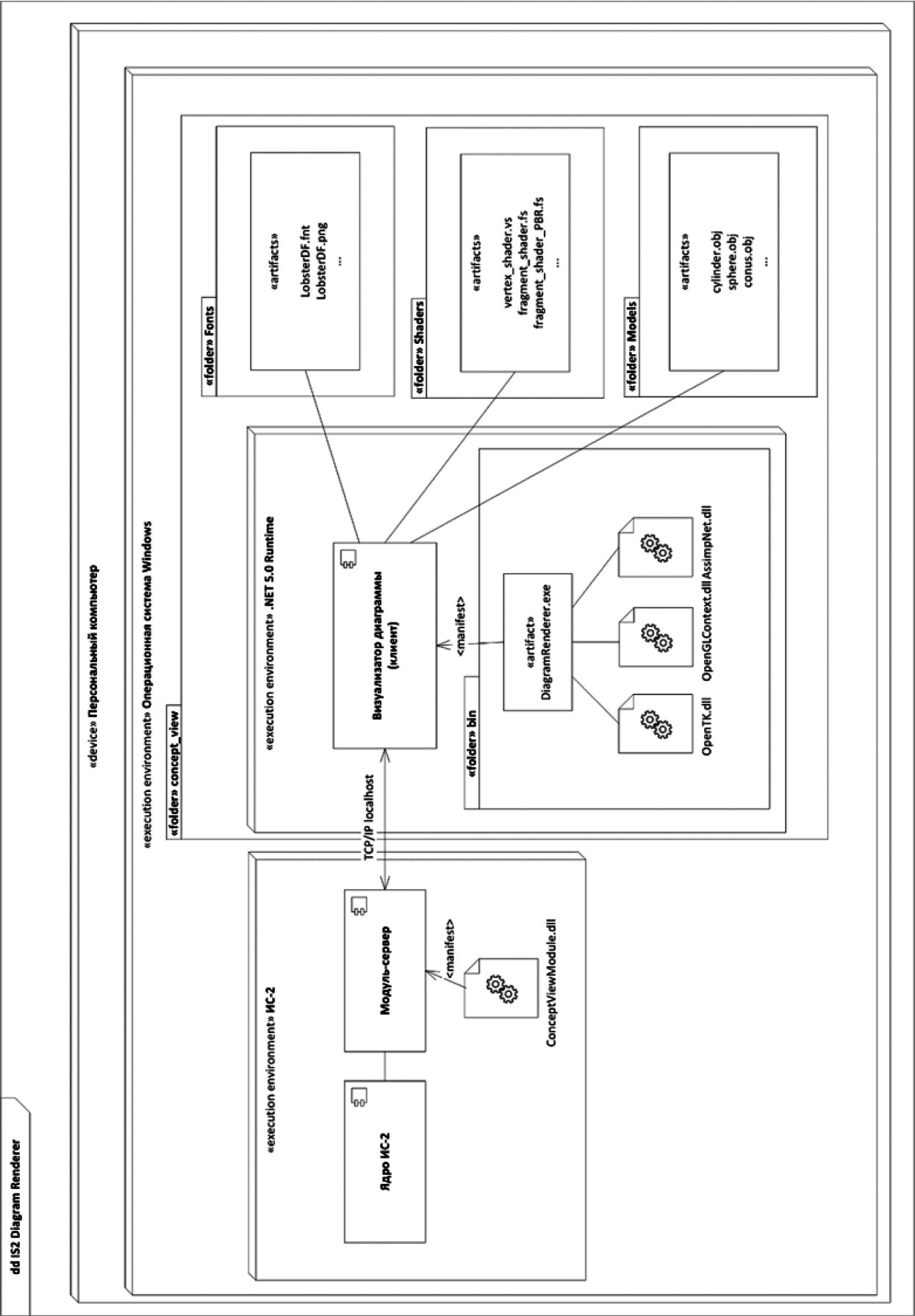


Рис. 1. Диаграмма развертывания модуля для визуализации представления

состояние модели между основным модулем и визуализатором.

Таким образом, реализованное решение позволяет использовать результаты формализованного моделирования по МАИТ в практической работе проектировщика, обеспечивая визуальное подкрепление формальных структур, повышение наглядности и поддержку анализа на этапе построения и согласования моделей.

Для обеспечения соответствия визуального представления формальной структуре моделей по методологии автоматизации интеллектуального труда (МАИТ), при разработке визуализирующего компонента были реализованы ряд специализированных технических решений. Эти решения направлены не только на повышение визуального качества трёхмерной сцены, но и на обеспечение читаемости и когнитивной доступности отображаемых моделей — критически важного аспекта в процессе системного анализа проектируемых автоматизированных систем.

Первым аспектом, критически важным для читаемости визуализируемой диаграммы является визуализация шрифтов и текста. Однако, конвейер рендеринга трёхмерной графики не предназначен для обработки векторных изображений в качестве текстур. Поэтому получать информацию о шрифтах и фигурах необходимо также из растровых изображений.

Также стоит отметить, что аффинные преобразования в виду интерактивной работы камеры при использовании модуля, производятся уже после отрисовки текста на блоках диаграммы, что дополнительно усложняет их четкую и качественную отрисовку. При большом увеличении или недостаточном разрешении текстуры с растровым шрифтом, на визуализируемых символах отчетливо заметен алиасинг и размытость контура (см. рис. 2).

Алиасинг можно устранить использованием альфа-тестирования — не выводить пиксель, если он обладает прозрачностью более установленного уровня, но это также приводит к нежелательному эффекту неровности контура символов (см. рис. 2).

Подходящим для такого сценария визуализации является представление шрифтов в виде знаковых полей расстояния (signed distance fields, SDF). В таком случае значение цвета пикселя представляют не фактический цвет, а расстояние до ближайшего контура фигуры с положительным значением снаружи контура и отрицательными внутри.

Определение цвета по порогу расстояния позволяет сгенерировать четкую двухмерную форму без размытия или алиасинга на контурах. Таким образом могут быть представлены детали не меньшие, чем один тексель. При этом границу между фигурой и фоном можно сделать бесконечно резкой, а поскольку значения выбранных текселей меняются плавно и в большинстве точек могут быть аппроксимированы как линейные изменения, выборка будет вести себя хорошо как при увеличении, так и при уменьшении изображения с использованием обычной билинейной интерполяции. Также стоит отметить, что для достижения схожего качества при визуализации, разрешение текстуры, в которой хранятся расстояния, может быть в несколько раз меньше обычной текстуры с растриванным векторным изображением, что положительно сказывается на объеме используемой памяти [5].

Решить проблему искажения текста при позиционировании блоков в пространстве позволяет его обработка и хранение в виде знаковых полей расстояния до самого последнего этапа растеризации трёхмерной сцены, когда все преобразования уже были применены. Вычислить необходимый параметр *width*, который определяет положение границы фигуры при преобразовании SDF в растр, позволяет модуль градиента яркости (*distance* — значение SDF в текущей точке), что удобно в реализации, так как шейдерные программы позволяют использовать функции $dFdx$, $dFdy$, хотя и конкретные значения соседних фрагментов изображения еще неизвестны:

$$width = |\mathbf{grad}(\mathit{distance})| = \sqrt{\frac{\partial F^2}{\partial x} + \frac{\partial F^2}{\partial y}}.$$

На основании данного параметра и некоторого константного значения *threshold*, с использованием эр-



Рис. 2. Отрицательные эффекты размытости и неровности контуров

митовой интерполяции (*smoothstep*), текст может быть преобразован из представления в виде знаковых полей расстояния в растровый вид, где граница фигуры будет ровной и четкой [6]:

$$\text{color} = \text{smoothstep} \left(\begin{matrix} \text{threshold} - \text{width}, \\ \text{threshold} + \text{width}, \text{distance} \end{matrix} \right)$$

Это позволяет добиться качественной визуализации текста вне зависимости от режима просмотра диаграммы и позиции блоков на ней (см. рис. 3).



Рис. 3. Конечный результат визуализации текста, позволяющий сохранить четкость при преобразованиях в пространстве

Другой задачей, критически влияющей на качество изображения, является устранение так называемой «зубчатости» (эффекта алиасинга) на границах объектов. Для достижения высокого визуального качества и гибкости визуализатора в рамках реализованного решения были предусмотрены несколько независимых методов сглаживания.

Наиболее универсальный, но ресурсоёмкий метод — SSAA (Supersample Anti-Aliasing). В его основе лежит отрисовка сцены в буфере увеличенного разрешения с последующим масштабированием результата до стандартного размера. Это позволяет значительно уменьшить искажения на границах объектов за счёт интерполяции цветов пикселей.

Более производительный и широко применяемый метод — MSAA (Multisample Anti-Aliasing). В данной схеме каждый пиксель сцены содержит несколько точек выборки, что позволяет точно учитывать пересечение геометрии с границами пиксельной сетки. При этом отрисовка примитивов в сцене корректно суммирует вклад от всех подвыборок, что даёт хороший эффект сглаживания без увеличения разрешения.

В случаях, когда производительность системы ограничена, предлагается использовать FXAA (Fast Approximate Anti-Aliasing) — алгоритм постобработки, реализуемый в виде фрагментного шейдера, который анализирует уже готовое изображение и выполняет сглаживание на основе оценки контуров. Он не требует изменения графического конвейера или создания специальных буферов, при этом обеспечивает приемлемое

качество без существенных затрат ресурсов.

Все перечисленные методы были реализованы в составе визуализатора как взаимозаменяемые опции. Это позволяет адаптировать уровень визуального качества под конкретную конфигурацию системы, при этом обеспечивая гарантированную читаемость и чёткость диаграммы — ключевой фактор в задаче анализа и интерпретации моделей по МАИТ. На рисунке 4 представлено наглядное сравнение результатов визуализации без сглаживания и с применением MSAA 4x, демонстрирующее существенное улучшение качества визуализации.

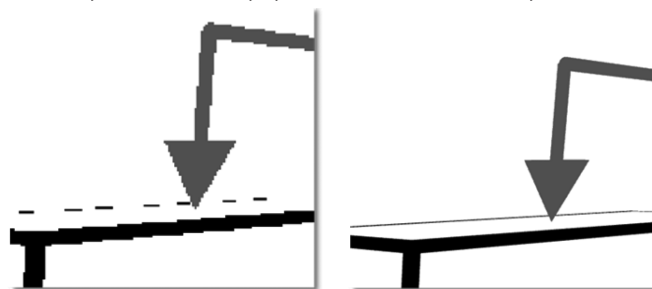


Рис. 4. Отключенное сглаживание (слева) и MSAA 4x (справа)

Для реализации интерактивного взаимодействия пользователя с элементами трёхмерной диаграммы в визуализаторе была применена методика идентификации объектов через буфер уникальных цветов (*color picking*). Каждый элемент модели при вспомогательном проходе рисуется в отдельный offscreen-буфер, где ему сопоставляется уникальный цвет-код, недоступный для визуального отображения. При клике пользователя по сцене координаты пикселя экрана преобразуются в координаты буфера, и по цвету извлекается идентификатор соответствующего объекта модели. Такой подход обеспечивает точное и производительно эффективное определение выбранного элемента, вне зависимости от масштаба, перспективных искажений и наложения объектов.

Для обеспечения устойчивой и отзывчивой работы визуализатора, особенно при обработке сложных моделей с большим числом структурных элементов, была реализована асинхронная архитектура исполнения операций. Основной принцип подхода — разделение логики построения сцены и процесса её отрисовки на независимые потоки исполнения, работающие параллельно. Это позволило исключить блокировки пользовательского интерфейса и обеспечить непрерывную интеракцию со сценой — вращение, масштабирование и выбор объектов возможны даже в процессе генерации геометрии.

Ключевые операции — чтение входных данных, разбор модели, построение графов, генерация координат и буферизация вершин — выполняются в отдельных задачах, инициируемых по мере поступления команды

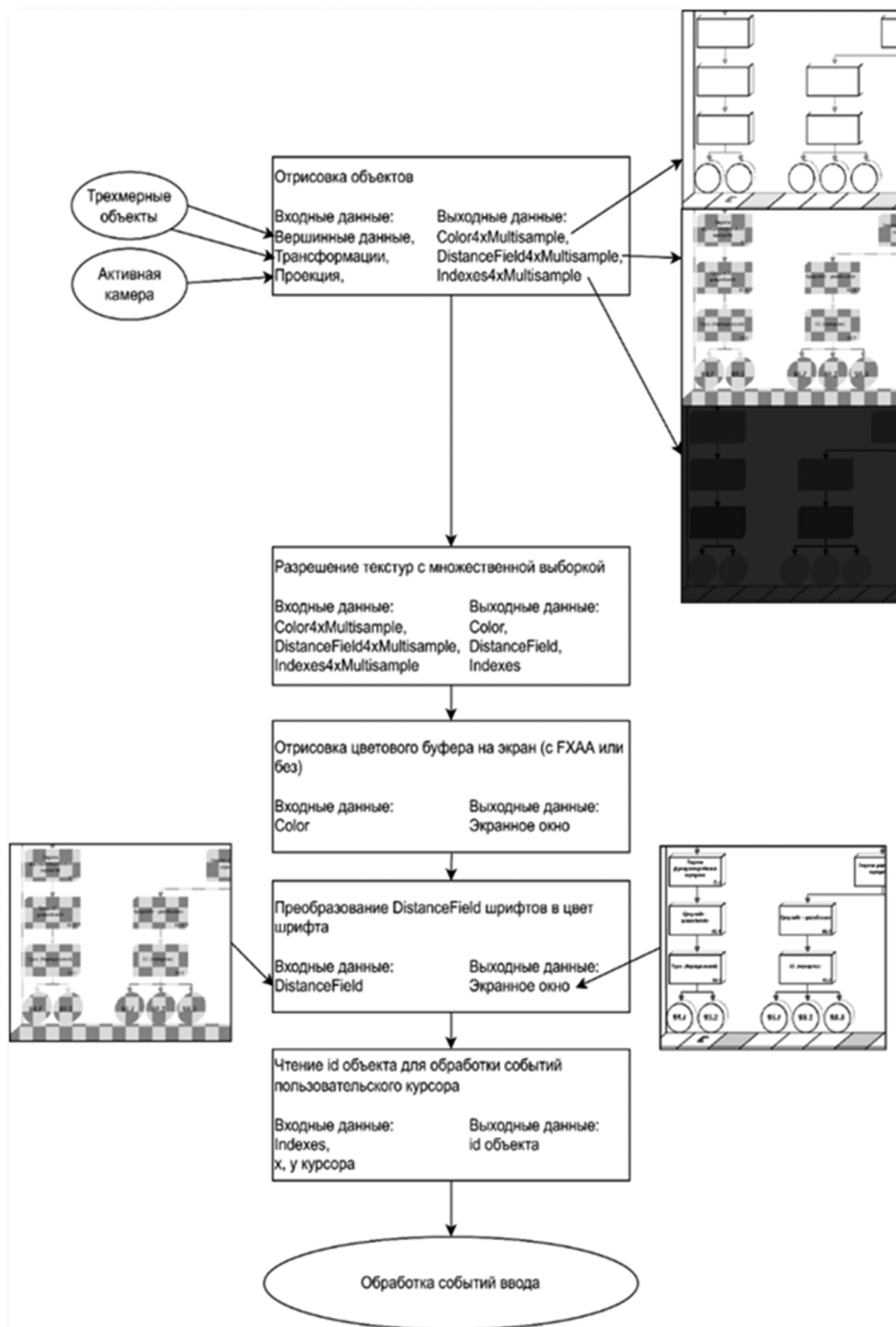


Рис. 5. Общий вид графического конвейера

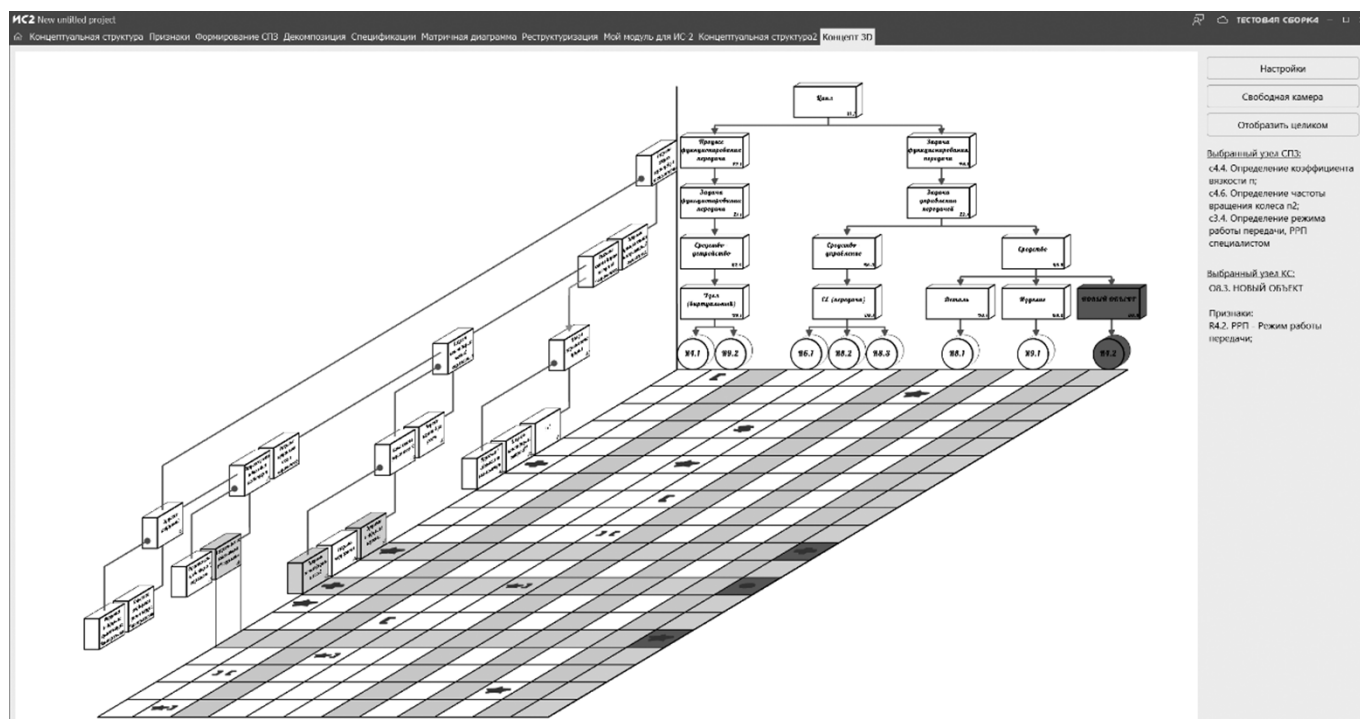


Рис. 6. Разработанный программный модуль для визуализации моделей в целом по МАИТ в рамках интегрированной среды «ИС-2»

от управляющего модуля. Основной графический поток занимается исключительно отрисовкой содержимого буфера кадра, не ожидая завершения тяжёлых вычислительных операций. Благодаря такому разделению достигается гибкость масштабирования: крупные модели визуализируются пошагово, с постепенным появлением фрагментов сцены, что повышает субъективную плавность восприятия.

В общем виде, графический конвейер, реализующий визуализацию сцены с трёхмерным представлением модели в целом, включает несколько последовательных этапов. Сначала объекты диаграммы отрисовываются во вспомогательный буфер с поддержкой множественной выборки (MSAA), содержащий несколько текстурных прикреплений: для цветовой информации, шрифтов в формате distance fields и целочисленного массива идентификаторов объектов для трёхмерного выбора. После этого содержимое буфера разрешается в текстуры стандартного разрешения (см. рис. 5).

Затем в экранный буфер выводится цветовая информация объектов диаграммы, а шрифты преобразуются из SDF-представления в обычное цветковое изображение и накладываются поверх сцены. После завершения визуализации осуществляется выборка идентификатора объекта из текстуры с индексами в соответствии с координатами курсора, что обеспечивает корректную обработку пользовательского ввода.

Таким образом был реализован полнофункциональный программный модуль, интегрированный в состав визуальной среды «ИС-2». Он обеспечивает автоматическое построение трёхмерного графического представления модели в целом по МАИТ, отображение всех структурных компонентов, поддержку пользовательского взаимодействия и визуальный анализ модели. На рисунке представлена итоговая сцена, сформированная с помощью разработанного модуля, демонстрирующая интеграцию статической, динамической составляющих и их взаимосвязей в едином пространстве визуализации (см. рис. 6).

Разработанное в рамках работы программное средство, а именно модуль для визуализации представления моделей в целом для визуальной интегрированной среды «ИС-2», было использовано в учебном процессе кафедры информационных технологий и вычислительных систем (ИТиВС) ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» при выполнении задач в рамках подготовки бакалавров и магистров. Это позволило сократить время, затрачиваемое на анализ модели автоматизированной системы в среде визуального проектирования «ИС-2», иначе говоря, использование разработанного программного модуля предоставляет возможность повысить эффективность (сократить время, улучшить качество) проверки модели АС для когнитолога или проектировщика автоматизированных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилов А.Г. Разработка метода моделирования и средств поддержки управления развитием визуальной интегрированной среды проектирования автоматизированных систем: дис. ... канд. техн. наук / А.Г. Гаврилов. — Москва: МГТУ «СТАНКИН», 2022. — 224 с.
2. Волкова Г.Д. Теория и практика автоматизации интеллектуального труда. / Волкова Г.Д. — М.: Янус-К, 2020. — 104 с. — ISBN 978-5-8037-0805-6
3. Глинкин М.О. Разработка графической нотации для представления моделей в целом по методологии автоматизации интеллектуального труда / М.О. Глинкин, О.В. Новоселова // Инженерный вестник Дона. — 2024. — № 5(113). — С. 756–770. — EDN JRTMXG.
4. Глинкин М.О. Формальное описание графической нотации для представления моделей в целом по методологии автоматизации интеллектуального труда / М.О. Глинкин, О.В. Новоселова // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2024. — № 6–2. — С. 92–96. — DOI 10.37882/2223–2966.2024.6-2.12. — EDN SQWXJC.
5. Густавсон С. Отображение двумерных форм с помощью полей расстояний / С. Густавсон // OpenGL Insights (Опыт сообщества OpenGL, OpenGL ES и WebGL). — 2012. — С. 173–182.
6. Грин К. Улучшенное масштабирование векторных текстур с альфа-тестированием для спецэффектов / К. Грин // Курс SIGGRAPH по продвинутой визуализации в реальном времени в 3D-графике и играх. — 2007. — С. 9–16. — DOI: 10.1145/1281500.1281665.

© Глинкин Максим Олегович (maximglin05@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ АУДИТА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ОРГАНИЗАЦИЯХ ФИНАНСОВОГО СЕКТОРА

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR CONDUCTING AN INFORMATION SECURITY AUDIT IN FINANCIAL SECTOR ORGANIZATIONS

I. Gorbachev
M. Rytov
O. Golembiovskaya
E. Gorbachev

Summary. The number of successful cyber attacks in the financial sector is growing year by year. The more comprehensive and complete an object's security system is, the higher its security against external interference will be. At the same time, in real business conditions, it is possible to assess the completeness of protection only through regular checks and periodic in-depth audits of the effectiveness of the entire information security system. The article proposes a methodology for conducting an information security audit in financial sector organizations, which allows for the most comprehensive assessment of the facility's information security system, based on comprehensive requirements of GOST R 57580. The compliance assessment algorithm presented in the framework of the methodology helps simplify the audit procedure for financial organizations and make it more systematic.

Keywords: audit, financial sector, information security.

Горбачев Иван Владимирович

Аспирант,

Брянский государственный технический университет

ivan1.ru@mail.ru

Рытов Михаил Юрьевич

Доцент,

Брянский государственный технический университет

rmy@tu-bryansk.ru

Голембиовская Оксана Михайловна

Кандидат технических наук,

Брянский государственный технический университет

golembiovskaya@tu-bryansk.ru

Горбачев Егор Павлович

Финансовый университет при Правительстве РФ

me@septembernocturne.ru

Аннотация. Количество успешных кибератак в финансовом секторе год от года растет. Чем более комплексной и полной будет система защиты объекта, тем выше будет его защищенность от внешнего вмешательства, при этом в реальных условиях функционирования бизнеса оценить полноту защиты можно только посредством регулярных проверок и периодического глубокого аудита эффективности всей системы защиты информации. В рамках статьи предложена методика проведения аудита информационной безопасности в организациях финансового сектора, которая позволяет наиболее комплексно оценить систему защиты информации объекта, опираясь на всеобъемлющий по требованиям ГОСТ Р 57580. Представленный в рамках методики алгоритм проведения оценки соответствия требованиям помогает упростить процедуру аудита для финансовых организаций и сделать ее более системной.

Ключевые слова: аудит, финансовый сектор, информационная безопасность.

Информатизация как явление в настоящее время затронула все процессы нашей жизни. Не является исключением и сфера финансовой и банковской деятельности. Именно в данной сфере перевод в цифровой формат происходит быстрее всего, поскольку деятельность связана с большим количеством оформляемой документации, также с удобством обслуживаемых клиентов, большинство из которых предпочитают электронные платежные системы наличному расчету.

По данным Positive Technologies [1] количество успешных кибератак в финансовом секторе год от года растет. Среди последствий атак чаще других выделяются утечки данных (64 %), а также остановка работы отдельных сервисов или ключевых бизнес-процессов (40 %). Подавляющее большинство утечек содержат персональ-

ные данные клиентов и коммерческую информацию организаций. Кроме того, среди утечек нередко можно обнаружить номера платежных карт и учетные данные, в утечках страховых компаний присутствует и медицинская информация.

Чем более комплексной и полной будет система защиты объекта, тем выше будет его защищенность от внешнего вмешательства, при этом в реальных условиях функционирования бизнеса оценить полноту защиты можно только посредством регулярных проверок и периодического глубокого аудита эффективности всей системы защиты информации.

Процедура аудита позволяет не только оценить, насколько защищена инфраструктура объекта, но и при

необходимости в ходе проверки внести в нее коррективы, закрывая обнаруженные пробелы.

Нормативно-правовая база определяет ключевые принципы проведения аудита информационной безопасности в организациях финансового сектора. Анализ отечественных нормативных правовых актов в этой сфере позволяет выявить основные требования, в соответствии с которыми производится процедура аудита, а также отметить ключевые особенности его реализации.

На основе анализа требований нормативно-правовой базы и научной литературы [2; 3; 4; 5; 6; 7; 8, с. 90; 9, с. 183; 10; с. 195] в отношении проведения аудита ИБ организаций финансового сектора сделан вывод о том, что аудит информационной безопасности организаций, связанных с финансовой и банковской деятельностью целесообразно производить посредством оценки их соответствия требованиям ГОСТ Р 57580.

По результатам оценки направлений защиты, описанных в вышеуказанном ГОСТ производится итоговая оценка соответствия, которая включает в себя качественную оценку уровня соответствия процессов системы защиты информации, а также числовую итоговую оценку соответствия защиты информации. После чего принимается решение о необходимости совершенствования системы защиты информации

Далее будет кратко описан порядок реализации каждого из этапов оценки.

Стандарт 57580.1–2017 определяет три уровня защиты информации, минимальный, стандартный, усиленный.

В финансовой организации формируются один или несколько контуров безопасности, для которых может быть установлен разный уровень защиты информации. Уровень защиты информации финансовой организации для конкретного контура безопасности устанавливается нормативными актами Банка России на основе:

- вида деятельности финансовой организации, состава предоставляемых финансовых услуг, реализуемых бизнес-процессов и (или) технологических процессов в рамках данного контура безопасности;
- объема финансовых операций;
- размера организации, отнесения финансовой организации к категории малых предприятий и микропредприятий;
- значимости финансовой организации для финансового рынка и национальной платежной системы.

На основе Положений Банка России [4; 5; 6; 7] разработана анкета (таблица 1), позволяющая однозначно

на основе специфики деятельности организации сделать вывод о необходимом уровне защиты информации в соответствии со стандартом. Важно последовательно ответить на все вопросы с первого до получения результата об актуальном уровне защиты, а не выбирать отдельные вопросы, поскольку анкета построена в иерархическом порядке.

Таблица 1.

Фрагмент анкеты оценки уровня защиты контур(-ов) безопасности объекта для организаций финансового сектора

№ п/п	Вопрос / варианты	
1	Объект относится к системно значимым кредитным организациям / кредитным организациям, выполняющим функции оператора услуг платежной инфраструктуры системно значимых платежных систем / кредитным организациям, значимым на рынке платежных услуг?	
	Да	Нет
	Для объекта актуален 1 уровень защиты	Перейдите к вопросу 2
2	Объект участвует в предоставлении операционных услуг и услуг платежного клиринга (ОПКЦ)?	
	Да	Нет
	Для объекта актуален 1 уровень защиты	Перейдите к вопросу 3
..
11	Объект относится к банковским платежным агентам (субагентам) и привлекается в целях осуществления переводов денежных средств?	
	Да	Нет
	Для объекта актуален 3 уровень защиты	

Использование анкеты позволяет установить уровень защиты контур(-ов) безопасности объекта, не прибегая к анализу отдельных положений Банка России.

Оценка выбора финансовой организацией организационных и технических мер ЗИ, направленных на непосредственное обеспечение ЗИ и входящих в систему ЗИ финансовой организации, полноты реализации организационных и технических мер ЗИ, направленных на непосредственное обеспечение ЗИ и входящих в систему организации и управления ЗИ финансовой организации, а также оценка защиты информации на этапах жизненного цикла АС финансовой организации осуществля-

ются на основе таблиц, представленных в рамках ГОСТ Р 57580.1–2017. Для оптимизации и упрощения данных этапов и рассмотрения таблиц стандарта, рекомендуется разработать расширенные таблицы-анкеты, в которых каждая из мер дополнена конкретными рекомендациями, позволяющими оценить выполнено ли данное требование и составить план совершенствования системы защиты информации объекта, если ряд необходимых требований не реализован. В таблице 2 приведен фрагмент оценочной таблицы-анкеты для раздела «Оценка выбора финансовой организацией организационных и технических мер ЗИ, направленных на непосредственное обеспечение ЗИ и входящих в систему ЗИ финансовой организации».

Каждую из мер необходимо оценить:

0 — не выбрана (при отсутствии у проверяемой организации свидетельств ее реализации),

1 — выбрана (при предъявлении проверяемой организацией свидетельств ее реализации).

Условное обозначение в рамках таблицы:

- «О» — реализация путем применения организационной меры защиты информации;
- «Т» — реализация путем применения технической меры защиты информации;
- «Н» — реализация является необязательной.

После заполнения анкет числовые значения оценки каждого из трех процессов рассчитываются по формулам, описанным в рамках ГОСТ Р 57580.1–2017.

Итоговая оценка соответствия ГОСТ Р 57580 включает в себя качественную оценку уровня соответствия процессов системы защиты информации (на основе показателя E_p) и числовую оценку соответствия системы защиты информации рассматриваемому ГОСТу (R).

Показатель E_i рассчитывается по каждому процессу отдельно по формуле 1.

$$E_i = \frac{E_{пзи} + (0,2E_{пз} + 0,4E_{рз} + 0,25E_{кз} + 0,15E_{сз})}{2}, \quad (1)$$

где $E_{пзи}$ — числовое значение оценки, рассчитанной по итогам этапа «Оценка выбора финансовой организа-

Таблица 2.

Фрагмент анкеты оценки выбора финансовой организацией организационных и технических мер ЗИ (фрагмент)

Обозначение и № меры	Содержание мер системы защиты информации	Уровень защиты информации			Отметка о реализации (1/0)
		1	2	3	
Процесс 1 «Обеспечение защиты информации при управлении доступом»					
УЗП — Управление учетными записями и правами субъектов логического доступа					
Базовый состав мер по организации и контролю использования учетных записей субъектов логического доступа					
УЗП.1	Осуществление логического доступа пользователями и эксплуатационным персоналом под уникальными и персонифицированными учетными записями	Т	Т	Т	
		Реализуется путем регистрации персонифицированной учетной записи с помощью технических решений таких как Active Directory, встроенных в АС, СУБД, ОС, средств виртуализации подсистемы управления доступом, средств для реализации персонифицированного доступа, например: Secret Net Studio (для Windows) Secret Net LSP (для Linux). Или его аналогами.			
УЗП.2	Контроль соответствия фактического состава разблокированных учетных записей фактическому составу легальных субъектов логического доступа	0	0	Т	
		Реализуется путем закрепления меры в Политике управления доступом, должны быть закреплены порядок, периодичность контроля состава и прав учетных записей субъектов доступа с формированием отчетного документа. А также назначен ответственный за предоставление доступа к системе (например, администратор ИБ), данная обязанность закрепляется в должностной инструкции.			
...

цией организационных и технических мер ЗИ, направленных на непосредственное обеспечение ЗИ и входящих в систему ЗИ финансовой организации». отдельно по каждому из процессов.

E_n, E_p, E_k, E_c — числовые значения оценок, рассчитанных по итогам этапа «Оценка полноты реализации организационных и технических мер ЗИ, направленных на непосредственное обеспечение ЗИ и входящих в систему организации и управления ЗИ финансовой организации» для i -того процесса.

i — номер процесса, для которого рассчитывается E_i .

В случае если на объекте несколько контуров безопасности, то E_i вычисляется отдельно для каждого контура, а потом складывается с учетом весовых коэффициентов для разных уровней защиты.

В случае если на объекте три контура с 1, 2 и 3 уровнем защиты, то показатель E_i вычисляется по формуле 2, если два контура с 1 и 2 уровнем защиты, то показатель E_i вычисляется по формуле 3, если два контура с 1 и 3 уровнем защиты, то показатель E_i вычисляется по формуле 4, если два контура со 2 и 3 уровнем защиты, то показатель E_i вычисляется по формуле 5.

$$E_i = 0,6E_{1i} + 0,3E_{2i} + 0,1E_{3i} \quad (2)$$

$$E_i = 0,7E_{1i} + 0,3E_{2i} \quad (3)$$

$$E_i = 0,8E_{1i} + 0,2E_{3i} \quad (4)$$

$$E_i = 0,6E_{2i} + 0,4E_{3i} \quad (5)$$

где E_{1i} — контур с первым уровнем защиты, E_{2i} — контур со вторым уровнем защиты, E_{3i} — контур с третьим уровнем защиты.

Качественная оценка уровня соответствия процессов системы защиты информации вычисляется на основе таблицы, представленной в ГОСТ Р 57580.2–2018 (таблица 3).

Таблица 3.

Качественная оценка уровня соответствия процессов системы ЗИ

E_i	Уровень соответствия
$E_i = 0$	нулевой
$0 < E_i \leq 0,5$	первый
$0,5 < E_i \leq 0,7$	второй
$0,7 < E_i \leq 0,85$	третий

E_i	Уровень соответствия
$0,85 < E_i \leq 0,9$	четвертый
$0,9 < E_i \leq 1$	пятый

Числовую итоговую оценку соответствия защиты информации R вычисляют по формуле (6) как среднееарифметическое значение оценок E_i для всех процессов системы ЗИ и оценки E_{AC} , полученной на этапе «Оценка защиты информации на этапах жизненного цикла АС финансовой организации».

$$R = \frac{\sum_{i=1}^T E_i + E_{AC}}{T + 1} - 0,01Z, \quad (6)$$

где E — оценка соответствия защиты информации i -го процесса системы защиты информации;

i — номер процесса системы защиты информации;

T — количество процессов системы защиты информации, вошедших в область оценки соответствия защиты информации.

E_{AC} — оценка полноты применения организационных и технических мер защиты информации на этапах жизненного цикла АС финансовой организации.

Z — количество нарушений защиты информации, выявленных членами проверяющей группы в процессе оценки соответствия защиты информации. Перечень возможных нарушений представлен в приложении Б ГОСТ Р 57580.2 — 2018.

В случае, если полноту применения организационных и технических мер защиты информации на этапах жизненного цикла АС финансовой организации не оценивают ($E_{AC} = 0$), то в знаменателе формулы (6) указывают только значение T .

Числовые оценки соответствия защиты информации R превышающие числовое значение 0,85, соответствуют уровню, рекомендуемому Банком России.

По результатам проведенной оценки должны быть заполнены отчетные формы, шаблоны которых представлены в приложениях А и В ГОСТ Р 57580.2–2018.

Таким образом, описанная методика проведения аудита информационной безопасности в организациях финансового сектора позволяет наиболее комплексно оценить систему защиты информации объекта, опираясь на всеобъемлющий по требованиям ГОСТ Р 57580. Представленный алгоритм значительно упростит процедуру проведения аудита в соответствии с рассматриваемым ГОСТом, а также создаст базу для автоматизации проведения данной оценки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киберугрозы финансовой отрасли [Электронный ресурс] — режим доступа: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/financial-industry-security-interim-2023/> (Дата обращения: 15.02.2025)
2. ГОСТ Р 57580.1-2017. Национальный стандарт Российской Федерации. Безопасность финансовых (банковских) операций. Защита информации финансовых организаций. Базовый состав организационных и технических мер» (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 08.08.2017 N 822-ст).
3. ГОСТ Р 57580.2-2018 Национальный стандарт Российской Федерации. Безопасность финансовых (банковских) операций. Защита информации финансовых организаций. Методика оценки соответствия (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 22.03.2018 N 156-ст).
4. Приказ Минцифры России № 930 «Об утверждении порядка обработки, включая сбор и хранение, параметров биометрических персональных данных, порядка размещения и обновления биометрических персональных данных в единой биометрической системе и в иных информационных системах, обеспечивающих идентификацию и (или) аутентификацию с использованием биометрических персональных данных физических лиц, а также требований к информационным технологиям и техническим средствам, предназначенным для обработки биометрических персональных данных в целях проведения идентификации».
5. Положение Банка России от 25 июля 2022 г. N 802-П «О требованиях к защите информации в платежной системе Банка России».
6. Положение Банка России от 4 июня 2020 г. № 719-П «О требованиях к обеспечению защиты информации при осуществлении переводов денежных средств и о порядке осуществления Банком России контроля за соблюдением требований к обеспечению защиты информации при осуществлении переводов денежных средств».
7. Положение Банка России от 17 апреля 2019 г. N 683-П «Об установлении обязательных для кредитных организаций требований к обеспечению защиты информации при осуществлении банковской деятельности в целях противодействия осуществлению переводов денежных средств без согласия клиента».
8. Гулак М. Л. Аудит информационной безопасности. Прикладная статистика: учебное пособие / М.Л. Гулак, М.Ю. Рытов, О.М. Голембиовская. — Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2020. — 121 с. — ISBN 978-5-4497-0713-0. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/97630.html> (дата обращения: 06.02.2025).
9. Швецов, А.Н. К оценке процесса распространения дезинформации в социальных сетях / А.Н. Швецов // Вестник МАНЭБ. — 2023. — Т. 28, № 3. — С. 89–91. — EDN ANSSBA.
10. Жидко Е.А. Методология исследований информационной безопасности экологически опасных и экономически важных объектов: монография / Е.А. Жидко. — Воронеж: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2015. — 183 с. — ISBN 978-5-89040-535-7. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/55011.html> (дата обращения: 06.02.2025).
11. Сычев Ю.Н. Стандарты информационной безопасности. Защита и обработка конфиденциальных документов: учебное пособие / Ю.Н. Сычев. — Саратов: Вузовское образование, 2018. — 195 с. — ISBN 978-5-4487-0128-3. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/72345.html> (дата обращения: 06.02.2025).

© Горбачев Иван Владимирович (ivan1.ru@mail.ru); Рытов Михаил Юрьевич (rmy@tu-bryansk.ru);

Голембиовская Оксана Михайловна (golembiovskaya@tu-bryansk.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МОДЕЛИ РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИЙ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

MODELS FOR CALCULATING CONCENTRATIONS OF HARMFUL SUBSTANCES IN THE SURFACE LAYER OF THE ATMOSPHERE

**K. Zavitaev
O. Yagolnitzer**

Summary. One of the main sources of atmospheric air pollution are combined heat and power plants and boiler heating plants that use gas or coal as the initial fuel. During the technological process of fuel combustion, several gaseous and fine-dispersed substances are produced, negatively affecting both the ecological situation of the region and the state of human health, resulting in significant risks for global environmental problems and an increase in people with chronic lung diseases. There are many models, techniques, and calculation methods with the help of which it is possible to monitor not only the behaviour of harmful substances in the atmospheric air, but also to assess the content of pollutants in the surface layer of the atmosphere, considering a variety of factors. Purpose of work: to conduct a comparative analysis of existing models, techniques, and methods of calculation of concentrations of harmful substances used to solve environmental problems, to identify the advantages and disadvantages, and based on the work done to make a proposal to consider a new automated methodology for calculating pollutants in the surface layer of the atmosphere, including machine learning tools.

Keywords: calculation methods, dispersion of harmful substances, pollutants, techniques, models, dispersion mechanisms, machine learning.

Завитаев Кирилл Витальевич

Аспирант, ФГАОУ ВО «Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»
k.zavitaev@stankin.ru

Ягольницер Ольга Владимировна

кандидат технических наук,
ФГАОУ ВО «Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»
o.yagolnicer@stankin.ru

Аннотация. Одним из основных источников загрязнения атмосферного воздуха являются теплоэлектроцентрали и котельные тепловые станции, использующие в качестве исходного топлива газ или уголь. Во время технологического процесса сжигания топлива образуется ряд газообразных и мелкодисперсных веществ, негативно влияющих как на экологическую обстановку региона, так и на состояние здоровья людей, в результате чего создаются существенные риски для возникновения глобальных экологических проблем и увеличения людей с хроническими заболеваниями легких. Существует множество моделей, методик и методов расчета, с помощью которых можно отслеживать не только поведение вредных веществ в атмосферном воздухе, но и проводить оценку содержания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы с учетом множества факторов. Цель работы: провести сравнительный анализ существующих моделей, методик и методов расчета концентраций вредных веществ, использующих для решения природоохранных задач, выявить достоинства и недостатки, и на основании проведенной работы сделать предложение по рассмотрению новой автоматизированной методики расчета загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, включающая в себя инструменты машинного обучения.

Ключевые слова: методы расчета, рассеивание вредных веществ, загрязняющие вещества, методики, модели, механизмы рассеивания, машинное обучение.

Введение

Основными загрязняющими веществами, образующиеся в результате антропогенной деятельности человека, являются диоксид серы, диоксида азота, угарный газ, избыточное накопление углекислого газа, влияющее на параметрическое загрязнение и изменение климатических показателей воздуха, аэрозоли преимущественно фиброгенного действия или взвешенные частицы, а также диоксины, содержание которых в воздухе может привести к возникновению ряда серьезных заболеваний вплоть до появления злокачественных опухолей.

Следовательно, перед инженерной экологией стоит ряд очень важных задач: исследование поведения

газовой струи в воздухе, содержащая в своем составе вредные вещества, образующиеся в результате сжигания топлива на ТЭЦ и котельных, создание различных методик, с помощью которых можно проводить оценку уровня загрязнения атмосферного воздуха, и практическое применение методов расчета концентраций вредных веществ.

Исследование образуемых веществ

В результате сжигания топлива в топочной камере котла образуется ряд веществ, оказываемых влияние как на состояние окружающей среды, так и на здоровье человека, причем виды веществ зависят от используемого сырья. Как правило, это природный газ и в редких случаях уголь. Каменный уголь является одним из самых грязных

ископаемых и перед использованием в промышленности всегда подвергается первичной и вторичной переработкам, благодаря которой содержание серы уменьшается в разы. Несмотря на то, что уголь в современном мире используется действительно очень редко, он все равно имеет место быть на некоторых ТЭЦ из России.

Если говорить про природный газ, то не зря его называют одним из чистых видов топлива, так как при его использовании в промышленности, как минимум, не образуется диоксида серы и взвешенных частиц. Таким образом, концентрация данных веществ не нормируется.

Диоксид серы — газ без цвета с резким запахом, имеет высокую степень токсичности, при поступлении в организм человека может вызывать раздражение легких, появление кашля и насморка.

Угарный газ — при небольшом содержании в приземном слое атмосферы может вызывать удушье и головные боли.

Диоксины (бенз(а)пирен) — образуются в небольших количествах и имеет жесткие ограничения на установленные санитарно-гигиенические нормативы. Имеет накопительный эффект и в результате длительного воздействия может приводить к возникновению злокачественных опухолей, что может впоследствии привести к возникновению летального исхода.

Взвешенные частицы (PM) — образуются в результате неполного сгорания топлива, при высоких концентрациях в воздухе может оказывать влияние как на легкие, так и на раздражение слизистой вместе с кожей. Наиболее часто возникающие заболевания — бронхит и астма [1, с. 734].

Оксиды азота (NO и NO_2) — имеют два основных источника образования — природный и антропогенный. Если говорить про оксид азота, то оно является неустойчивым соединением и в процессе окисления превращается в более опасный компонент, как диоксид азота, который вследствие возникновения природных явлений, таких как дождь, является основным фактором для образования азотной кислоты, которая при попадании на кожу человека может привести к возникновению серьезных последствий [2, с. 53–54].

Ориентируясь на научные исследования по негативному воздействию вредных веществ на здоровье человека, перед инженерной экологией стоит задача нормирования и разработка наиболее качественных методик, учитывающих различные механизмы рассеивания вредных веществ.

При моделировании и исследовании распространения вредных веществ по всему объему дымового об-

лака обычно учитываются такие факторы, как источник загрязнения, метеорологические условия (температура, категория устойчивости атмосферы, турбулентность, скорость и направление движения ветра), а также химические свойства самих веществ.

Разрабатывая эффективные методики расчета и модели рассеивания вредных веществ в атмосфере, можно заниматься не только прогнозированием изменения динамики концентрации загрязняющих веществ, но и применять эффективные меры и стратегии по минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду [3, с. 1–2].

Основные механизмы рассеивания вредных веществ и процессы, оказывающие влияние на распределение примесей в воздухе показаны на рисунке 1.

Если говорить про одни из наиболее основных факторов рассеивания вредных веществ, как инерционное турбулентное перемешивание примесей и категорию устойчивости атмосферы, то они влияют как на перенос веществ в воздухе, так и на их свойства [4, с. 13]. Например, при наиболее благоприятном классе устойчивости, когда происходит перемешивание верхних более холодных слоев воздуха с нижними и более теплыми, наблюдаются минимальные и в пределах нормы значения концентраций вредных веществ.

Наиболее особым спросом пользуется модель Гаусса, где рассеивание вредных веществ подчиняется закону нормального распределения и учитывается в двух взаимно расположенных плоскостях y и z . При этом функции рассеивания примесей напрямую зависят как от класса устойчивости атмосферы, так и от скорости и направления движения ветра, а также другими встречающимися погодными явлениями, например, облачность.

Особое внимание стоит уделить утвержденной методике расчета рассеивания вредных веществ МРР-2017, являющуюся действующей расчетной моделью для прогнозирования и исследования динамики изменения концентрации примесей. Данная модель является факельной и позволяет учитывать коэффициент рельефа местности [5, с. 44].

Например, стоит упомянуть автора [6, с. 264], который разработал математическую модель рассеивания и переноса вредных веществ, где он решал задачу распространения загрязняющих веществ от мгновенного точечного стационарного источника загрязнения атмосферы в предположении частичного поглощения вредных компонентов примесей. Для создания расчетного алгоритма и теоретического обоснования проведенного эксперимента были применены численные методы.

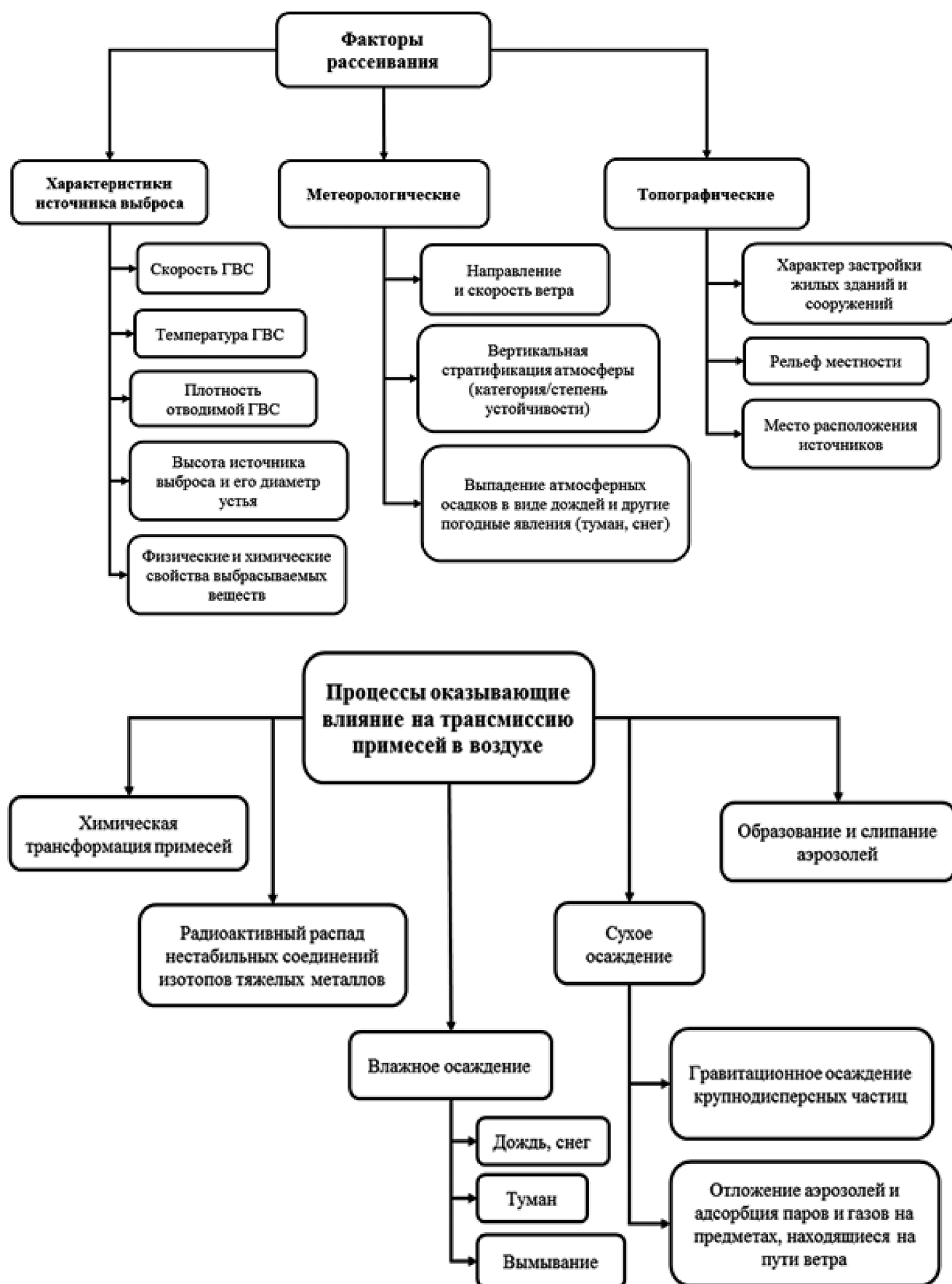


Рис. 1. Механизмы рассеивания и распространения вредных веществ в атмосфере

В данной работе мы также отдельно рассмотрим диффузионную модель Навье-Стокса, где процесс переноса примесей описан с помощью достаточно непростых уравнений диффузии, однако авторы [7, с. 1–2] для исследования аварийного или залпового выброса, который может нести за собой повышенную концентрацию веществ, использовали усредненную по Рейнольдсу вышеописанную модель для различных категорий устойчивости атмосферы, учитывая как благоприятные так и не самые подходящие погодные условия для рассеивания вредных веществ.

Ориентируясь на то, что в современном мире существует достаточно большое количество как отечественных, так и зарубежных методик, каждая из них может быть вполне рассмотрена как один из методов для проведения автоматизированного расчета и прогнозирования различных типов веществ. Например, Сысоева и Гильманова [8, с. 1028–1030] уделяют особое внимание разбору и сравнительную анализу существующих методик для оценки влияния на состояние окружающей среды в результате передвижения автотранспорта.

Ссылаясь на авторов Сысоеву и Гильманову, в данной работе будет проведен сравнительный анализ методик, моделей и методов расчета загрязняющих веществ, образуемых в результате сжигания топлива.

Материалы и методы

В качестве материалов в статье были отобраны и проанализированы отечественные и зарубежные методики расчета рассеивания загрязняющих веществ с учетом множества условий. Сравнительный анализ был проведен на основе опыта использования молодых ученых в научно-исследовательской литературе.

В данной статье используется множество методов, построенных как на основе математического моделирования, так и статистического анализа данных, где в качестве случайной величины будет выступать значение концентрации вещества.

Результаты и обсуждения

Существует множество моделей рассеивания загрязняющих веществ, описывающих их поведение в атмосферном воздухе.

Применение математического моделирования, утвержденных моделей рассеивания веществ и основанных на нем программных пакетов играет существенную роль в контроле уровня загрязнения крупных промышленных городов. Такие модели, как правило, являются отличным инструментом для количественной оценки антропогенного воздействия человека [9, с. 159], а также

необходимы для системы управления качеством обеспечения защиты атмосферного воздуха. Даже если посмотреть на историю создания фундаментальных исследований, то можно сказать, что каждая из моделей может вполне найти практическое применение, особенно в области прогнозирования. Поэтому выбор модели будет прежде всего зависеть от санитарно-гигиенических требований по качеству обеспечения атмосферного воздуха, которые жестко регламентируются экологическим законодательством по обеспечения безопасности воздушной среды.

На основе обзора часто встречающихся моделей рассеивания вредных веществ проведем сравнительный анализ на качество решения природоохранных задач и выявим достоинства и недостатки при проведении исследования. Результаты исследования отражены в таблице 1.

Таблица 1.

Достоинства и недостатки математических, статистических и расчетных моделей рассеивания вредных веществ в атмосфере

Типы используемых моделей	Достоинства и недостатки
Модель переноса примесей	<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Наиболее упрощенная модель. • Используются для изучения влияния одиночных источников, выбросы которых содержат твердые частицы, переносимые на большие расстояния. • Из-за простоты модели возможна комбинация использования с другими моделями. <p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Данная модель не учитывает вторичные химические превращения, преобразования и трансформацию примесей. • Не учитывает влияние метеорологических факторов рассеивания. • Не пригодна для оценки концентрации веществ вблизи выброса от источника (на не удаленном расстоянии).
Гауссова модель	<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Простота расчета и высокая точность оценки максимальной приземной концентрации. • Позволяет получать удовлетворительные результаты для расстояний до 20 км от источника выброса. • Учитываются метеорологические факторы (скорость ветра), вторичные превращения примесей и турбулентная диффузия выбрасываемых веществ. • Имеется возможность дополнительного усовершенствования модели (учет категории устойчивости, характера застройки местности).

Типы используемых моделей	Достоинства и недостатки
	<p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> Отсутствие учета рельефа местности, характер застройки (в том числе расположение источников относительно зданий). Из-за отсутствия некоторых топографических факторов оценка концентрации веществ вблизи источника может быть не точной.
Метод Монте-Карло	<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> Достаточно высокая точность измерения. Возможность отслеживания траектории случайно блуждающих частиц. <p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> Дают точную оценки только по одной траектории движения примесей в воздушной среде, учет нескольких траекторий дает ошибочные результаты (отклонения) и не рационален.
Модель градиентного переноса	<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> Данная модель учитывает пространственно-временной перенос примесей в воздухе. Учитывает скорость ветра в направлении движения примеси в воздухе. Учет турбулентной диффузии газовой смеси. Используется функция, описывающая параметры источника выброса (высота, диаметр устья, параметры выброса ГВС). <p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> Не учитывает метеорологические особенности местности. Нет учета географических особенностей местности (неровности, рельеф местности, характер застройки сооружений).
Модель, основанная на применении уравнения Навье-Стокса (для вязкого газа)	<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> Возможность описания процесса переноса примесей на основе использования уравнений: диффузии газов и твердых аэрозолей, влажности и потенциальной температуры. <p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> Сложные расчеты и долгий процесс решения громоздких математических уравнений.
Моделирование распространения вредных веществ при переменном профиле скорости	<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> Учитывает коэффициент взаимодействия исследуемой примеси с подстилающей поверхностью. Учет скорости взаимодействия вещества с окружающей средой. Учитываются параметры источника загрязнения. Есть возможность отследить частичное накопление примесей.

Типы используемых моделей	Достоинства и недостатки
	<p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> Сложные и громоздкие уравнения с элементами математических расчетов. Не учитывается коэффициент рельефа местности или топографические факторы рассеивания вредных веществ. Не учитывается температура выброса, не сделан акцент на метеорологические факторы рассеивания вредных веществ за исключением скорости ветра.
Модель WRF-CFD	<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> Сочетает в себе сразу же несколько моделей, что очень удобно для отслеживания влияния различных процессов, происходящих в атмосфере, на диффузию веществ. Отлично подходит для изучения распространения вредных веществ в результате возникновения залповых выбросов. Оценка содержания вредных веществ производится с учетом категории устойчивости атмосферы. <p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> Не учитывает топографические факторы рассеивания вредных веществ (рельеф местности). Отлично подходит для изучения динамики распространения опасных газов, но не актуальна для аэрозолей и взвешенных частиц. Не учитывает влажность воздуха, озеленение территории и влияние жилой застройки на динамику изменения концентраций газообразных веществ.
Модель Берлянда (ОНД-86)	<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> Возможность вести расчет приземной концентрации на основе турбулентной диффузии дымового облака. Имеется возможность вести расчет максимальных приземных концентраций при умеренно неустойчивом состоянии атмосферы. Концентрации примесей усредняются по 20–30 минутному интервалу. Учитывает характеристики источника загрязнения, опасную скорость ветра. Возможность вести расчет и для горячих, и для холодных выбросов. Методика не включает в себя громоздких решений уравнений. <p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> Расчетная модель не учитывает класс вертикальной стратификации или категории устойчивости атмосферы. Не учитывает шероховатость подстилающей поверхности (коэффициент рельефа местности). Методика применима для расчета примесей на расстоянии не более чем 100 км от источника загрязнения.

Типы используемых моделей	Достоинства и недостатки
MPP-2017	<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Является улучшенной версией модели Берлянда. • Учитывает топографические факторы рассеивания вредных веществ (коэффициент рельефа местности). • Возможность проведение расчета при неблагоприятных метеорологических условиях. • Учитывает, как параметры источника загрязнения, так и параметры выброса. <p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Не учитывает влажность воздуха. • Не учитывает влияние жилой застройки и озеленение территории. • Не найдено влияние давления атмосферного воздуха в сочетании оказываемого воздействия на человека.

Обсуждение

Несмотря на все достоинства и недостатки представленных расчетных моделей, к настоящему времени общепринятой модели не существует. Это объясняется сложностью и разнообразием процессов, происходящих в атмосфере, потому что выбрасываемые вещества могут быть активны и взаимодействовать между собой. Также постоянно меняющиеся погодные условия и многие другие факторы ограничивают в выборе постоянной модели.

Если посмотреть на выше проведенный сравнительный анализ, то каждая из моделей учитывает, как местоположение, так и характеристики источника выброса, однако при анализе других механизмов, таких как метеорологические и топографические факторы рассеивания вредных веществ, в некоторых моделях об этом сказано лишь косвенно либо не учитывается вообще.

Выбор расчетной модели определяется поставленными задачами экологических организаций перед охраной воздуха и от точности моделирования. Все зависит от того, на что направлена экологическая политика той или иной организации.

Также следует отметить следующее преимущество, благодаря которому необходимо обязательно прово-

дить такую аналитическую работу — это предпосылки для создания новых, более качественных и имеющих мощные инструменты для прогнозирования и проведения автоматизированных расчетов модели рассеивания вредных веществ. К тому же если посмотреть на сравнительный анализ существующих методик, моделей и методов расчета еще раз, то можно заметить, что ни в одной из них не уделено изучению влияния озеленения территории, влажности и давления на изменение динамики концентрации вредных веществ в приземном слое атмосферы.

В изучении вопросов инженерной экологии есть два очень важных и незаменимых критерия — прозрачность и качество предоставляемых данных. И здесь отличным способом станет применение и создание модели машинного обучения — эффективного метода, с помощью которого можно находить новые взаимосвязи в виде математических формул.

Методы машинного обучения позволяют не только заниматься прогнозированием в режиме реального времени, но и с помощью них можно обрабатывать большие массивы данных, собранные по данным метеорологических и экологических станциях мониторинга [10, с. 110].

Заключение

Проведен сравнительный анализ наиболее популярных существующих методик, моделей и методов расчета концентраций вредных веществ в приземном слое атмосферы с учетом влияния механизмов рассеивания вредных веществ, были определены области применения существующих методик расчета и выявлены достоинства и недостатки.

После проведения сравнительного анализа следует, что для решения природоохранных задач имеет место быть разработке новой методики или модели расчета загрязняющих веществ, учитывая влияние влажности и давление воздуха, а также озеленение территории.

В ходе работы было предложено использование и создание модели машинного обучения, как эффективного метода для нахождения новых зависимостей между переменными и прогнозирования содержания вредных веществ в атмосфере с учетом механизмов рассеивания веществ в режиме реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кесарецких К.С., Горлов П.В. Состав выбросов теплоэнергетики и их влияние на здоровье население // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Секция «Техносферная безопасность». — 2021. Том 2. С. 733–735.
2. Дрыгваль А.В., Дрыгваль П.В., Табунщик В.А. Оценка содержания диоксида азота (NO_2) в атмосфере над крымским полуостровом в период 2019–2023 гг. // Учёные записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. Том 10 (76). № 4. 2024 г. С. 53–67.
3. Madiyarov M.; Temirbekov N.; Alimbekova N.; Malgazhdarov Y.; Yergaliyev Y.A. Combined Approach for Predicting the Distribution of Harmful Substances in the Atmosphere Based on Parameter Estimation and Machine Learning Algorithms. *Computation* 2023, 11, 249. p. 1–25.
4. Акимов Л.М., Акимов Е.Л. Пространственно-временные закономерности формирования аэротехногенного загрязнения атмосферы в условиях вертикальной «неустойчивости» в Центральном Черноземье // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2023. Т. 17. № 2. С. 11–22.
5. Семакина А.В. Основные математические подходы для оценки процессов рассеяния примеси в атмосферном воздухе // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 2. С. 42–64.
6. Aydosov A.; Urmashev B.; Zaurbekova G. Modeling the spread of harmful substances in the atmosphere at a variable velocity profile. *Open Eng.* 2016, 6, p. 264–269.
7. Zhou H., Song W., Xiao K. Simulating flow and hazardous gas dispersion by using WRF–CFD coupled model under different atmospheric stability conditions. *Atmosphere* 2022, 13, 1072.
8. Сысоева Е.В., Гельманова М.О. Методы расчета рассеивания загрязняющих веществ в городской атмосфере // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 8. С. 1027–1045.
9. Ветрова Ю.В., Радоуцкий В.Ю. Модели распространения вредных веществ в окружающей среде // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012, №4. С. 159–162.
10. Федутин К.А. Машинное обучение в задачах поддержки принятия решений при управлении охраной природы / К.А. Федутин // Инженерный вестник Дона. — 2021. — № 9(81). — С. 100–113.

© Завитаев Кирилл Витальевич (k.zavitaev@stankin.ru); Ягольницер Ольга Владимировна (o.yagolnicer@stankin.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МОДЕЛЕЙ ГАУССА И MPP-2017 С ПОМОЩЬЮ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

QUALITY ASSESSMENT OF GAUSS AND MRR-2017 MODELS BY APPLYING THE METHOD OF REGRESSION ANALYSIS

**K. Zavitaev
O. Yagolnitzer**

Summary. The article is devoted to the topic of regression analysis of Gauss and MRR-2017 models, where the quality assessment of two models was carried out for the predetermined parameters of the technological process, as well as the dependence between the distance from the pollution source and the concentration of nitrogen dioxide was determined. Regression analysis and quality assessment of Gaussian and MRR-2017 models were carried out for two closely located sources of pollution, which are the basis for the diversion of harmful substances formed because of fuel combustion in the boilers of the boiler plant. The aim of the work is to determine the strength of the closeness of the relationship between the distance from the pollution source and the concentration of the studied substance, as well as to assess the quality of the most popular models of dispersion of harmful substances as a means of automating the distribution of the content of harmful substances in the surface layer of the atmosphere. Special attention is paid to the comparative analysis of Gaussian and MRR-2017 models using the criteria of coefficient of determination and sum of squares of residuals, the value of which determines the quality of the two studied models for forecasting. Using regression analysis, it is possible to determine not only how good a particular model is and can be used by environmental protection agencies, but also to create prerequisites for training and improving new models in environmental protection activities.

Keywords: regression analysis, coefficient of determination, sum of squares of residuals, Gaussian model, MRR-2017, model quality, automation tools.

Завитаев Кирилл Витальевич

Аспирант, ФГАОУ ВО «Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»
k.zavitaev@stankin.ru

Ягольницер Ольга Владимировна

кандидат технических наук,
ФГАОУ ВО «Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»
o.yagolnicer@stankin.ru

Аннотация. Статья посвящена теме регрессионного анализа моделей Гаусса и MPP-2017, где проводилась оценка качества двух моделей при заранее известных параметрах технологического процесса, а также определялась зависимость между расстоянием от источника загрязнения и концентрацией диоксида азота. Регрессионный анализ и оценка качества моделей Гаусса и MPP-2017 проводились для двух близко расположенных источников загрязнения, являющимися основой для отвода образуемых вредных веществ в результате сжигания топлива в котлах котельной тепловой станции. Целью работы является определение силы тесноты связи расстояния от источника загрязнения и концентрации исследуемого вещества, а также оценка качества наиболее популярных моделей рассеивания вредных веществ в приземном слое атмосферы. Особое внимание уделяется сравнительному анализу моделей Гаусса и MPP-2017 с помощью критериев коэффициента детерминации и суммы квадратов остатков, значение которых и определяет качество двух исследуемых моделей для прогнозирования. Используя регрессионный анализ можно определить не только то, насколько та или иная модель хороша и может использоваться агентствами по защите окружающей среды, но и создавать предпосылки для обучения и улучшения новых моделей в природоохранной деятельности.

Ключевые слова: регрессионный анализ, коэффициент детерминации, сумма квадратов остатков, модель Гаусса, MPP-2017, качество моделей, средства автоматизации.

Введение

В настоящее время выбросы промышленных предприятий оказывают существенное влияние на здоровье людей и состояние окружающей среды.

Для решения этой проблемы предприятия прибегают не только к соблюдению экологического законодательства по нормированию массовых и валовых выбросов загрязняющих веществ, но и применяют различные методы автоматизации, с помощью которых можно решать как природоохранные задачи, так и на основе этого оптимизировать параметры технологического процесса.

Если рассмотреть котельные тепловые станции, как источник загрязнения атмосферного воздуха, то применение методов автоматизации таких как математическое моделирование или машинное обучение поможет не только распределять тепловую нагрузку котлов, но и подбирать оптимальные параметры процесса сжигания топлива, а также используемый вид сырья.

В этой статье затронем прежде всего тему математического моделирования, проведя анализ наиболее популярных расчетных моделей таких как, модель Гаусса и MPP-2017. Дополнительно оценим качество используемых

емых моделей, зная параметры технологического процесса, используя регрессионный анализ данных, а также определим силу тесноты связи между расстоянием от источника загрязнения и концентрацией загрязняющих веществ.

Научной новизной данной работы является нахождение зависимостей между расстоянием от источника загрязнений и содержанием диоксида в приземном слое атмосферного воздуха. При нахождении зависимости будут заранее известны, как параметры источника загрязнения, так и технические характеристики используемого оборудования.

Практической значимостью данной работы является то, что обе модели могут быть применены, однако их выбор зависит от того, насколько политика государства и агентства по защите окружающей среды жестко прилегают к установленным нормативам.

Целью работы является оценка качества моделей Гаусса и MPP-2017 с помощью регрессионного анализа и определение зависимости между расстоянием от источника загрязнения и концентрацией диоксида азота.

Материалы и методы

Регрессионный анализ и оценка качества моделей Гаусса и MPP-2017 проводились для двух близко расположенных источников загрязнения со следующими параметрами:

- Мощность выброса: $q_1=2,72$ г/с, $q_2=2,72$ г/с.
- Высота источника: $h_1=30$ м, $h_2=30$ м.
- Количество дымовых труб — 2.
- Диаметр устья каждого стационарного источника — $D=1,84$ м.
- Температура ГВС — $T=145$ °С.
- Объем дымовых отходящих газов — $V=20,69$ м³/с.

Исследуемое вещество — диоксид азота. Количество используемых котлов — 6 шт. (3 котла отводят образующую газовую смесь через одну трубу, 3 других котла через другую).

Метеорологические параметры района и топографические факторы местности, где размещены источники загрязнения:

- Средняя скорость ветра: $U=6$ м/с.
- Наиболее частые погодные явления: облачность и ветреная погода.
- Расчетная температура наиболее холодного месяца, $-10,2$ °С.
- Расчетная температура наиболее теплого месяца, $26,1$ °С.
- Коэффициент A , зависящий от температурной стратификации атмосферы — 140.
- Коэффициент оседания диоксида азота: $F=1$.

Расчетные точки для определения зависимости между расстоянием от источника загрязнения и концентрации диоксида азота, а также для последующей оценки качества моделей Гаусса и MPP-2017:

- С (48,8; 101,83; 2).
- С (100,87; 9,07; 2).
- С (418,53; -543,13; 2).
- С (513,59; 101,64; 2).
- С (841,23; 33,84; 2).

Оценка качества моделей Гаусса и MPPA-2017 и определение силы тесноты связи между расстоянием от источника загрязнения и концентрации диоксида азота проводится с помощью регрессионного анализа, где в качестве критериев определялись значения коэффициента детерминации и сумма квадратов остатков.

Литературный обзор

В статье Мамурова Б.Ж. и Абдуллаева Ж.Ж. описан метод применения регрессионного анализа, как один из эффективных способов нахождения зависимости между переменными, что позволяет оценить насколько итоговый результат может быть приближен к реальным значениям и хорошо зависит от множества факторов [1].

Например, Ефремов Н.Ю. занимаясь исследованием влияния технологических параметров на показатели качества наполненных полимеров применяет метод регрессионного анализа для моделирования зависимости показателей качества от параметров технологического процесса [2].

Однако в инженерной экологии еще не было случая, когда кто-то из авторов устанавливал зависимость между расстоянием от источника загрязнения и концентрацией вредного вещества, учитывая множество факторов, например, геометрические размеры источника загрязнения, метеорологические условия, параметры выброса и топографические факторы местности. Применяя регрессионный анализ, можно находить не только зависимость между переменными, но и проводить оценку качества как ранее использованных моделей, так и новых.

Результаты

Рассмотрим статистическую модель Гаусса.

Пространственное распределение загрязняющего вещества вдоль оси распространения факела, выбрасываемого от стационарного источника загрязнения, можно представить в виде одномерного уравнения Гаусса:

$$(x, y, z) = \frac{q}{2\pi\delta_y\delta_z u} \exp\left(\frac{-y^2}{\delta_y^2}\right) \left[\exp\left(\frac{-(z-h)^2}{\delta_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z+h)^2}{\delta_z^2}\right) \right],$$

где q — мощность выброса, г/с;
 h — высота источника, м;
 u — средняя скорость ветра, м/с;
 ось y — поперечно-горизонтальное направление;
 ось z — направлена вертикально вверх;
 δ_y и δ_z — горизонтальная и вертикальная функция рассеяния источника [3–4].

Помимо того, что данная модель подчиняется закону нормального распределения и отлично может быть применима в математике, особенно для распределения степени разброса случайной величины, в данной работе в роле случайной величины может выступать как раз значение концентрации загрязняющего вещества. В нашем случае это диоксид азота.

При рассмотрении стационарной модели Гаусса применяются допущения:

1. Рассеивание струи в двух взаимно расположенных плоскостях (горизонтальной и вертикальной) описывается гауссовым распределением со стандартными отклонениями распределения концентраций δ_y и δ_z по осям y и z соответственно.
2. Действующая на поведение газовой струи в воздухе и на турбулентное перемешивание частиц скорость ветра u считается постоянной во всем слое распространения струи, направление ветра не меняется. При расчете максимальной приземной концентрации вредных примесей учитывается средняя скорость ветра, характерная для района, где расположен источник загрязнения.
3. Мощность выброса постоянна.
4. Имеет место отражение струи от поверхности земли, т.е. нет гравитационного осаждения взвешенных частиц или взаимодействия струи с подстилающей поверхностью.

Вертикальная и горизонтальная функция рассеивания загрязняющих веществ зависит от категории устойчивости атмосферы, причем вертикальная стратификация атмосферного воздуха определяется от средней скорости ветра, характерной для конкретного района, степени инсоляции днем и облачностью ночью [5].

Формулы для вертикальной и горизонтальной функций рассеивания вредных веществ для δ_y и δ_z , рекомендованные Бриггсом для расстояний от 100 до 10000 м в условиях жилой застройки (городской) и открытой местности, приведены в таблице 1 [6].

Рекомендуемые классы устойчивости атмосферы по Паскуиллу в зависимости от метеорологических условий приведены в таблице 2.

Рассмотрим модель MPP-2017.

Таблица 1.

Формулы для вертикальной и горизонтальной функций рассеивания вредных веществ

Класс устойчивости атмосферы	Категория устойчивости	$\delta_y, \text{ м}$	$\delta_z, \text{ м}$
Открытая местность			
A	Сильно-неустойчивое (1)	$0,22x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,2x$
B	Неустойчивое (2)	$0,16x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,12x$
C	Слабо неустойчивое (3)	$0,11x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,08x(1+0,0002x)^{-1/2}$
D	Равновесное (4)	$0,08x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,06x(1+0,0015x)^{-1/2}$
E	Слабоустойчивое (5)	$0,06x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,03x(1+0,0003x)^{-1}$
F	Устойчивое (6)	$0,04x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,016x(1+0,0003x)^{-1}$
Городская местность			
A-B	Неустойчивое (1–2)	$0,32x(1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,24x(1+0,001x)^{-1/2}$
C	Слабо неустойчивое (3)	$0,22x(1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,2x$
D	Равновесное (4)	$0,16x(1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,14x(1+0,0003x)^{-1/2}$
E-F	Устойчивое (5–6)	$0,11x(1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,08x(1+0,0015x)^{-1/2}$

Таблица 2.

Классы устойчивости атмосферы Паскуилла [7–8]

Скорость ветра на высоте 10 м, м/с	Степень инсоляции днем			Облачность ночью, баллы	
	сильная	умеренная	слабая	10 (общая) или >5 (нижняя)	<4 (нижняя)
<2	A	A-B	B	–	–
2–3	A-B	B	C	E	F
3–5	B	B-C	D	D	E
5–6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Данная модель удобна тем, что анализ загрязнения атмосферного воздуха учитывается при неблагоприятных метеорологических условий и зависит от множества факторов: характеристики источника выброса, определяющие эффективную высоту ГВС, ширину газовой струи и температуру отводимой смеси; топографических факторов местности таких как рельеф местности и характер жилой застройки; параметров технологического процесса, влияющих на количество вредных веществ, выбрасываемых в окружающую среду, а также от вида используемого топлива (процентное содержание примесей и низшая теплота сгорания).

Значение максимальной приземной концентрации, зависящая от вышесказанных факторов рассеивания вредных веществ имеет вид:

$$C_m = \frac{A \times M \times F \times m \times n \times \mu}{H^2 \times \sqrt[3]{V_1 \times \Delta T}},$$

где A — коэффициент вертикальной стратификации атмосферы при неблагоприятных метеоусловиях;

M — масса загрязняющего вещества, выбрасываемого в единицу времени, г/с;

F — безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания примесей;

m и n — безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выброса из устья источника выброса;

μ — безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности;

H — высота источника выброса, м;

V_1 — объем или расход ГВС, м³/с;

ΔT — разность между температурой выбрасываемой ГВС T_r и температурой окружающего воздуха T_b , °C [9–10].

Итоговые значения концентраций диоксида азота, определенных с помощью моделей Гаусса и MPP-2017 приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Значения концентраций диоксида азота в приземном слое атмосферы

Вещество: 0301 Азота диоксид (двуокись азота, пероксид азота)		
Расстояние X, м	Концентр, мг/м ³ , MPP-2017	Концентр, мг/м ³ , модель Гаусса
48,8	0,016	0,004
100,87	0,02	0,07
418,53	0,048	0,082
513,59	0,054	0,066
841,23	0,044	0,01

Построим графики зависимостей концентрации диоксида азота от расстояния источника загрязнения, содержание которого были определены с помощью модели Гаусса и MPP-2017.

Если посмотреть на то, как меняются графики, то отчетливо можно заметить, насколько большая разница между значениями концентраций диоксида азота в каждой расчетной точке. Теперь осталось объяснить, какая



Рис. 1. Графики распределения концентраций диоксида азота при использовании моделей Гаусса и MPP-2017

из двух моделей лучше объяснила исследуемый ряд или набор данных. Для этого проведем регрессионный анализ моделей.

Чтобы понять, насколько та или иная модель хороша, чтобы ее в дальнейшем использовать как для прогнозирования, так и для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха, нужно опираться на два критерия: коэффициент детерминации и сумма квадратов остатков.

Коэффициент детерминации принимает значения от 0 до 1. Если рассматриваемый параметр приближается к 1, то данную оценочную модель мы можем считать хорошей.

Если говорить про критерий суммы квадратов остатков, то при проведении сравнительного анализа оценочных моделей лучше будет та, у которой значение этого критерия будет меньше.

Регрессионный анализ двух оценочных моделей приведена в таблице 4.

Таблица 4.

Регрессионный анализ

Регрессионная статистика		
	Модель Гаусса	MPP-2017
R-квадрат	0,032	0,62
Нормированный R-квадрат	0,031	0,5
Стандартная ошибка	0,041	0,012
Число исследуемых параметров	5	5

Расчет суммы квадратов остатков:

Как отмечалось ранее, в качестве зависимых и независимых переменных будут приниматься расчетные точки, которые и служат расстоянием от источника загрязнения, и концентрация диоксида азота в приземном слое атмосферы. Набор данных приведен в таблице 5.

Таблица 5.

Набор данных по модели Гаусса

№ п/п	X	Y
1	48,8	0,004
2	100,87	0,07
3	418,53	0,082
4	513,59	0,066
5	841,23	0,01

Расчетные коэффициенты регрессии приведены в таблице 6.

Таблица 6.

Расчетные коэффициенты регрессии

№ п/п	X	Y	X_i^2	Y_i^2	$X_i * Y_i$
1	48,8	0,004	2381,44	$1,6 * 10^{-5}$	0,195
2	100,87	0,07	10174,76	0,0049	7,06
3	418,53	0,082	175167,36	0,0067	34,32
4	513,59	0,066	263774,69	0,0044	33,896
5	841,23	0,01	707667,91	0,0001	8,41
Сумма	1923,02	0,232	1159166,16	0,0161	83,885

Сумма квадратов остатков определяются по формулам:

$$SS_{XX} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n X_i)^2 = 1159166,16 - 0,2 * (1923,02)^2 = 419564,97$$

$$SS_{YY} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n Y_i)^2 = 0,0161 - 0,2 * (0,232)^2 = 0,0053$$

$$SS_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n X_i) (\sum_{i=1}^n Y_i) = 83,88 - 0,2 * (1923,02) * (0,232) = -5,3433$$

Коэффициент наклона:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{SS_{XY}}{SS_{XX}} = \frac{-5,3433}{419564,97} = -0,000013$$

Общая сумма квадратов остатков принимает вид:

$$SS_{tot} = SS_{YY} = 0,0053$$

Сумма регрессии квадратов:

$$SS_R = \hat{\beta}_1 * SS_{XY} = -0,000013 * (-5,3433) = 0,0001$$

Общая сумма квадратов определяется как сумма регрессии квадратов и суммы квадратичных ошибок. Отсюда следует, что сумма квадратов остатков принимает вид и имеет значение:

$$SS_E = SS_{tot} - SS_R = 0,0053 - 0,0001 = 0,0052$$

Проведем аналогичный расчет для модели MPP-2017, после чего оценим, какая из двух ранее описанных моделей лучше и может использоваться для прогнозирования и анализа уровня загрязнения атмосферного воздуха. Набор зависимых и независимых переменных по модели MPP-2017 приведены в таблице 7.

Таблица 7.

Набор данных по модели MPP-2017

№ п/п	X	Y
1	48,8	0,016
2	100,87	0,02
3	418,53	0,048
4	513,59	0,054
5	841,23	0,044

Расчетные коэффициенты регрессии п модели MPP-2017 приведены в таблице 8.

Таблица 8.

Расчетные коэффициенты регрессии

№ п/п	X	Y	X_i^2	Y_i^2	$X_i * Y_i$
1	48,8	0,016	2381,44	$2,56*10^{-4}$	0,781
2	100,87	0,02	10174,76	0,0004	2,017
3	418,53	0,048	175167,36	0,0023	20,089
4	513,59	0,054	263774,69	0,0029	27,734
5	841,23	0,044	707667,91	0,0019	37,014
Сумма	1923,02	0,182	1159166,16	0,0078	87,636

Сумма квадратов остатков:

$$SS_{xx} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n X_i)^2 = 1159166,16 - 0,2 * (1923,02)^2 = 419564,97$$

$$SS_{yy} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n Y_i)^2 = 0,0078 - 0,2 * (0,182)^2 = 0,0012$$

$$SS_{xy} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n X_i) (\sum_{i=1}^n Y_i) = 87,636 - 0,2 * (1923,02) * (0,182) = 17,638$$

Коэффициент наклона:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{SS_{xy}}{SS_{xx}} = \frac{17,638}{419564,97} = 0,00004$$

Общая сумма квадратов остатков принимает вид:

$$SS_{tot} = SS_{yy} = 0,0012$$

Сумма квадратов регрессии:

$$SS_R = \hat{\beta}_1 * SS_{xy} = 0,00004 * 17,638 = 0,0007$$

Сумма квадратов остатков для модели MPP-2017:

$$SS_E = SS_{tot} - SS_R = 0,0012 - 0,0007 = 0,0005$$

Обсуждение

Исходя из полученных значений можно сделать следующий вывод: модель MPP-2017 лучше объяснила исследуемый набор данных, а именно зависимость между концентраций загрязняющих веществ и расстоянием от источника загрязнения. Если говорить про оценку качества модели, то MPP-2017 также лучше.

Этому есть ряд объяснений. MPP-2017 содержит много поправочных коэффициентов, влияющих как на распределение загрязняющих веществ, так и на их рассеивание в приземном слое атмосферы, например рельеф местности, герметические размеры источника загрязнения и метеорологические условия.

Однако, не стоит отказываться и от модели Гаусса. Данная модель может быть хороша в случае быстрого прогнозирования изменение концентрации загрязняющих веществ в случае возникновения залповых выбросов или аварийных ситуаций. Например, с помощью модели Гаусса можно быстро оценить содержание техногенных радионуклидов в случае возникновения аварии ядерного реактора.

За счет проведения оценки качества моделей и нахождения зависимостей между переменными создаются предпосылки для использования наиболее популярного средства автоматизации, как машинное обучение.

Проводя регрессионный анализ, можно не только найти новую зависимость, но и проверить насколько хорошо будет обучена та или иная модель.

Заключение

Регрессионный анализ — это отличный метод, с помощью которого можно проводить оценку моделей, используемых для прогнозирования любого интересующего нас параметра. Если говорить про природоохранную деятельность, то применение регрессионного анализа позволяет определить, как зависимость двух или нескольких переменных, так и понять, насколько применение той или иной модели будет хорошо использоваться в практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мамуров Б.Ж., Абдуллаев Ж.Ж. Регрессионный анализ как средство изучения зависимости между переменными // European science № 2 (58), 2021, с. 7–10.
2. Ефремов Н.Ю. Применение регрессионного анализа для исследования влияния технологических параметров на показатели качества наполненных материалов // Машиностроение и машиноведение, Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 22, № 4, 2020, с. 81–85.
3. Рашевский Николай Михайлович Поддержка принятия решений в процессе мониторинга загрязнения атмосферного воздуха городских территорий: диссертация кандидата технических наук: 05.13.01 Волгоград 2019, с. 144.
4. Copelli S., Barozzi M., Fumagalli A., Derudi M., Application of a Gaussian model to simulate contaminants dispersion in industrial accidents, (2019) Chemical Engineering Transactions, 77, pp. 799–804.
5. Рыбников П.А., Осадчая И.С. Математические модели распространения примесей в атмосфере. Теория и практика мировой науки. 2021. №11. С. 57–66.
6. Новицкая А.И., Игумнов Д.А. Моделирование распространения загрязняющих вещества в атмосфере на основании модели Гаусса. Студенческий вестник. 2019. № 35–2 (85). С. 61–66.
7. Jonathan D.W. Kahl, Hillary L. Chapman, Atmospheric stability characterization using the Pasquill method: A critical evaluation, Atmospheric Environment 187 (2018), pp. 196–209.
8. Прогнозно-аналитические решения по природным, техногенным и биологосоциальным угрозам единой системы информационно-аналитического обеспечения безопасности среды жизнедеятельности и общественного порядка «Безопасный город»: Монография / В.А. Акимов, А.В. Мишурный, О.В. Якимюк, А.В. Бобрешова, Е.О. Иванова, С.В. Колеганов, И.В. Курличенко, С.В. Пигина, Д.В. Степаненко, И.Ю. Щедров / Под ред. А.П. Чуприяна / МЧС России. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2022. 316 с.
9. Семакина А.В. Картографирование загрязнения атмосферного воздуха городской среды. Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2024. Т. 34. № 1. С. 41–53.
10. Крайнов В.А., Копеистова Д.Ю. Анализ подходов к моделированию выбросов в атмосферный воздух. В сборнике: Молодежь. Наука. Общество — 2022. 2023. С. 577–584.

© Завитаев Кирилл Витальевич (k.zavitaev@stankin.ru); Ягольницер Ольга Владимировна (o.yagolnicer@stankin.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕЖНЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИЦИИ СЕТЕЙ ПЕТРИ С ВРЕМЕННЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ АКТИВАЦИИ ПЕРЕХОДОВ

MODELLING OF ADJACENT CONTROLLED INTERSECTIONS USING A COMPOSITE PETRI NET WITH TEMPORAL CONSTRAINTS ON TRANSITION ACTIVATION

I. Kovatsenko
V. Pechenkin

Summary. Modelling traffic flows is a challenging task due to the high dynamism and stochasticity of the processes. Existing methods often do not consider the mutual influence of events, which reduces the accuracy of forecasting. The aim of the paper is to propose a method for modelling traffic flows based on the composition of Petri nets with constraints on the time of triggering transitions, which allows to analyze complex scenarios, including traffic accidents. The paper presents an approach that uses a composition of Petri nets with constraints on crossing time to describe the interaction between traffic flows and infrastructure. The method includes formalization of traffic rules, consideration of random events and analysis of system states. The application of the proposed approach is demonstrated on the example of road traffic accident modelling. The developed model allows analyzing traffic flows with high detail, including emergency situations. Experimental verification has shown the adequacy of the proposed model and the possibility of obtaining the characteristics of the traffic flow, for further assessment of the impact of accidents on the road situation and prediction of consequences. The proposed method can be used to optimize road infrastructure, develop traffic management systems, and simulate emergency situations. The approach has the potential for integration into intelligent transport systems.

Keywords: road traffic, regulated intersection, Petri net composition, time constraints Petri net, hybrid model.

Коваценок Игорь Николаевич

аспирант, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
igor.kovatsenko@yandex.ru

Печенкин Виталий Владимирович

доктор социологических наук,
кандидат физико-математических наук, профессор,
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
pechenkinvv@sstu.ru

Аннотация. Моделирование транспортных потоков является сложной задачей из-за высокой динамичности и стохастичности процессов. Существующие методы часто не учитывают взаимовлияние событий, что снижает точность прогнозирования. Цель работы — предложить метод моделирования транспортных потоков на основе композиции сетей Петри с ограничениями на период времени срабатывания переходов, позволяющий анализировать сложные сценарии, включая дорожно-транспортные происшествия. В статье представлен подход, использующий композицию сетей Петри с ограничениями на период времени срабатывания переходов для описания взаимодействия транспортных потоков и инфраструктуры. Метод включает формализацию правил движения, учет случайных событий и анализ состояний системы. На примере моделирования ДТП демонстрируется применение предложенного подхода. Разработанная модель позволяет анализировать транспортные потоки с высокой детализацией, включая аварийные ситуации. Экспериментальная проверка показала адекватность предложенной модели и возможность получения характеристик транспортного потока, для последующей оценки влияния ДТП на дорожную обстановку и прогнозирования последствий. Предложенный метод может быть использован для оптимизации дорожной инфраструктуры, разработки систем управления трафиком и моделирования чрезвычайных ситуаций. Подход обладает потенциалом для интеграции в интеллектуальные транспортные системы.

Ключевые слова: дорожный трафик, регулируемый перекресток, композиция сетей Петри, временные ограничения, гибридная модель.

Введение

Моделирование транспортных потоков в условиях городской инфраструктуры представляет собой сложную научно-техническую задачу, требующую учета множества взаимосвязанных факторов. Основная сложность заключается в необходимости точного отражения динамических характеристик транспортных потоков, которые подвержены существенным временным и пространственным вариациям [1].

В условиях стремительной урбанизации последних лет управление городским трафиком сталкивается со значительными сложностями. Важным аспектом является учет временных ограничений при управлении светофорными объектами. Традиционные подходы часто не позволяют адекватно моделировать задержки распространения транспортных потоков между смежными перекрестками, что приводит к существенным погрешностям при прогнозировании характеристик транспортной сети [2]. Особую сложность представляет син-

хронизация работы светофорных объектов в условиях переменной интенсивности движения, когда стандартные временные циклы оказываются неэффективными.

Масштабируемость моделей представляет отдельную методологическую проблему. С увеличением количества моделируемых объектов вычислительная сложность растет нелинейно, что ограничивает возможность анализа крупных транспортных сетей [3]. Особую актуальность приобретает разработка методов агрегации и декомпозиции, позволяющих сохранить адекватность модели при сокращении вычислительных затрат.

Существенное влияние на точность моделирования оказывает стохастическая природа транспортных потоков. Факторы случайного характера — дорожно-транспортные происшествия, погодные условия, сезонные колебания интенсивности — требуют применения вероятностных методов анализа. При этом сохраняется необходимость обеспечения устойчивости системы управления к подобным возмущениям [4].

Решение указанных проблем требует разработки формальных методов, сочетающих аналитические подходы с имитационным моделированием. Данная статья является продолжением работы авторов на тему моделирования транспортных потоков на регулируемых перекрестках с использованием временных сетей Петри [5].

Материалы и методы

В данной работе используется метод композиции временных сетей Петри (СП), учитывающих период времени активации переходов. На Рисунке 1 изображен фрагмент сети Петри из двух мест и перехода между ними. Основные определения используемой модели сети Петри с рядом дополнительных функциональных ограничений представлены в работах авторов [6, 7]. Каждому переходу присвоен интервал активации.

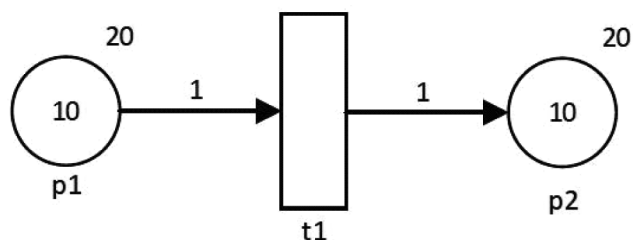


Рис. 1. Отображение сети Петри

В статье рассматривается модель системы из нескольких перекрестков с использованием СП. Система из нескольких сетей Петри, где выходы одной сети являются входами другой, далее именуется как композиция сетей Петри. Данный подход обеспечивает масштабирование модели на систему взаимодействующих перекрестков. Каждый перекресток представлен отдельным

модулем, взаимодействующим с соседними узлами через общие переходы. Этот подход, описанный в работах по адаптивному управлению сигналами с приоритетом общественного транспорта, позволяет гибко перенастраивать фазы светофоров при сохранении глобальной координации [8]. Также методы композиции сетей Петри рассматриваются в работе, в частности композиция, основанная на комбинаторном операторе [9].

При построении модели используются определения характеристик транспортного потока: объем (q), плотность (k), скорость (v), средняя скорость по времени (v_{time}), пространственная средняя скорость (v_{space}), средний интервал следования (h), дистанция (s), занятость полосы движения, а также выражения, полученные с использованием этих параметров [10, 11].

В статье используется следующая классификация моделей по уровню детализации: макроскопические, микроскопические, мезоскопические [12]. В работе [13] гибридная модель микро-мезоскопического уровня позволила использовать преимущества микроскопических моделей для анализа отдельных процессов с учетом характеристик транспортных средств — участников трафика, и одновременно с этим анализировать транспортные потоки в целом там, где не требуется глубокая детализация.

Результаты

Далее в статье будет рассмотрено использование модели с использованием композиции сетей Петри на примере двух смежных регулируемых перекрестков. Для удобства описания перекрестки именуются как «перекресток А» и «перекресток В». На Рисунке 2 изображена схема перекрестка В. Каждый перекресток состоит из четырех секций, сориентированных по сторонам света (Север — Юг — Восток — Запад). Каждая секция представлена подмножеством мест и переходов на сети Петри, на рисунке места и переходы представлены направлениями движения N, S, W, E.

Работа каждого перекрестка разбивается на фазы. Каждая фаза определяет разрешенные направления движений. Цикл фаз перекрестка — это повторение последовательных смен фаз перекрестка. Работа светофоров перекрестка с момента начала фазы I до момента окончания фазы II — это одна итерация цикла. Моделирование циклов фаз перекрестков обеспечивается ограничениями по времени s в сети Петри. На Рисунке 3 представлен цикл фаз перекрестка В. Длительности фаз I, II, III перекрестка А равны 40, 20, 25 секунд, соответственно. Длительности фаз I и II перекрестка В равны 40 и 30 секунд, соответственно.

На рисунке 4 изображен фрагмент композиции сетей Петри перекрестков — сеть для перекрестка В. На схеме



Рис. 2. Схема перекрестков

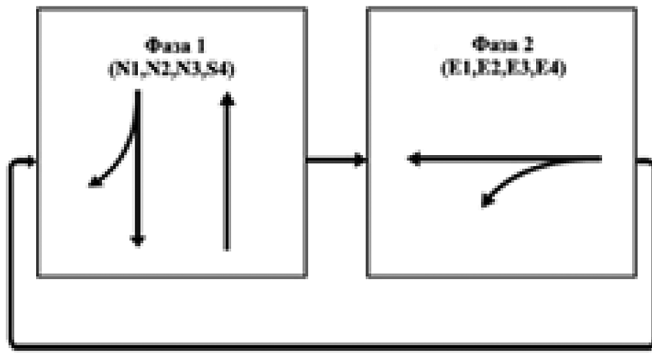


Рис. 3. Фазы перекрестков

выделены 4 области, места и переходы которых отражают соответствующие секции перекрестка В. Верхняя (темно-серая) область — это места и переходы, которые моделируют северную секцию перекрестка. Нижняя (серая), правая (средне-серая) и левая (светло-серая) моделируют, соответственно, южную, восточную и западную секции перекрестка. С частью сети Петри, соответствующей перекрестку А, можно ознакомиться в статье авторов [5]. На рисунке изображена часть сети Петри, моделирующая перекресток «В».

Места и переходы имеют следующие правила именования: префикс А или В обозначает к какому перекрестку относится место или переход; места накопления токенов обозначаются как X, Xout, XoutY, Xin и XbtwnY; переходы обозначаются как XgoOut, XgoY, Xsrc и Xout; где X и Y — это соответствующее направление движения на пере-

крестке (см. схему направлений движения на Рисунке 2). Переходы Xsrc и Xout являются генераторами и выходами сети Петри, для несмежных секций перекрестков. Места XbtwnY обеспечивают возможность моделирования ситуации перестроения транспортных средств между полосами движения.

Обсуждение

Так как начала и длительности итераций циклов фаз двух перекрестков не совпадают, то их необходимо согласовать по времени, для этого в модели описаны ограничения по времени для циклов фаз перекрестков. Последовательность циклов составляет 14 циклов фаз для перекрестка А и 17 циклов фаз для перекрестка В. Длительность последовательности циклов фаз составляет 1190 секунд — это время с момента начала фазы I перекрестка А и середины фазы I перекрестка В до первого повторения последовательности циклов (Рисунок 5). Верхняя строчка — это последовательность циклов фаз перекрестка А, где AI, AII, AIII обозначают фазы I, II и III перекрестка А. Нижняя строчка аналогично изображает последовательность циклов фаз перекрестка В.

В качестве критериев адекватности модели используется подход к верификации модели [5]. Основные критерии адекватности модели представлены выражениями:

$$\forall_{x \in P} k_x \leq cap_x, \quad (1)$$

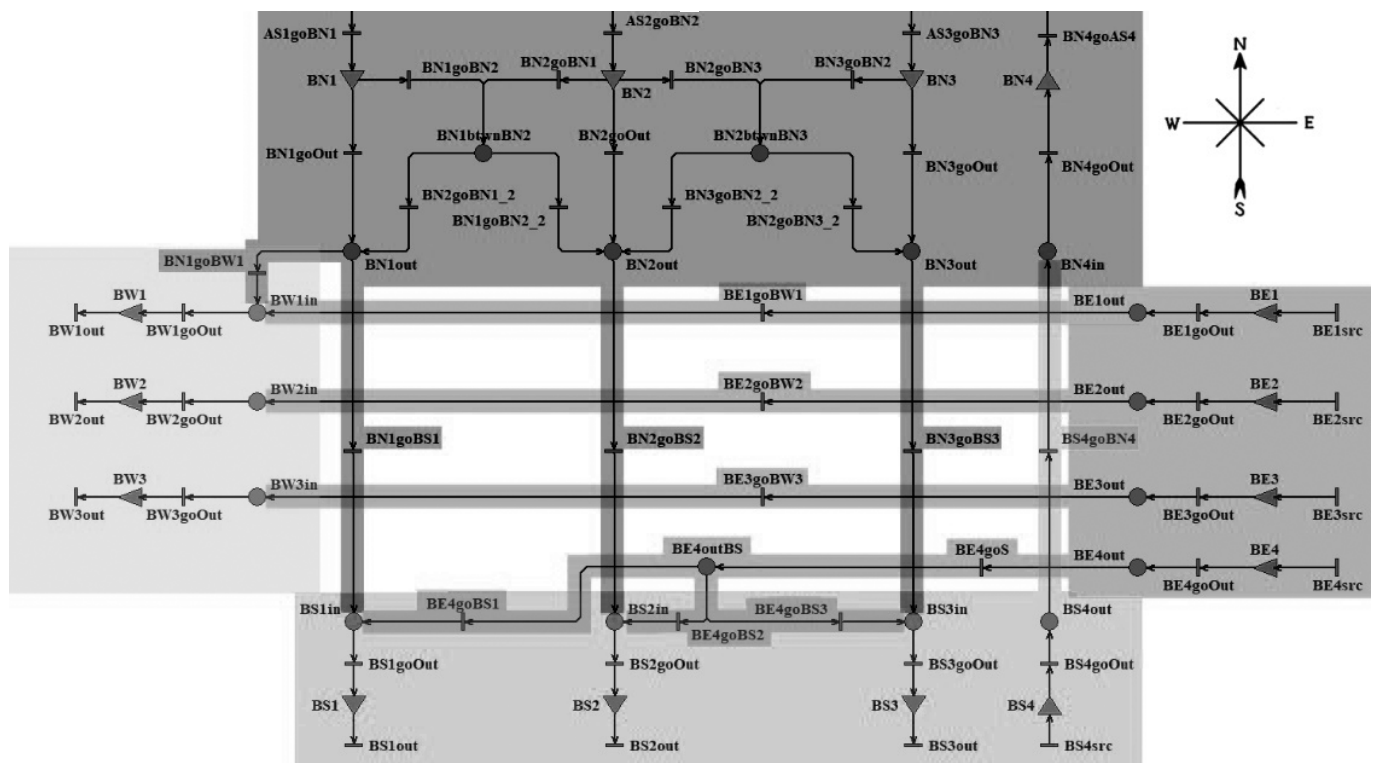


Рис. 4. Часть сети Петри для перекрестка В

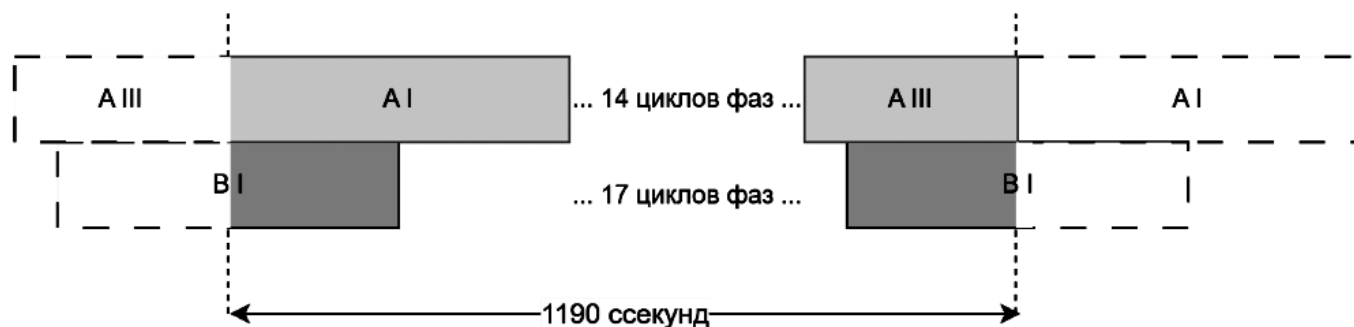


Рис. 5. Схема последовательности циклов фаз

где k_x — плотность транспортного потока на участке, представленная токенами места вершины x ; cap_x — вместимость участка дороги, представленного местом x .

$$\sum \Delta (act_{вых} - psg_{вых}) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $act_{вых}$ — число срабатываний переходов на выходах с перекрестка; $psg_{вых}$ — число реальных проездов транспортных средств на выезде с перекрестка.

$$\frac{act_{общ}}{\tau_{фаз}} \leq \varepsilon, \quad (3)$$

где $act_{общ}$ — общее число переходов симуляции; $\tau_{фаз}$ — длительность фазы; ε — предел допустимой погрешности.

$$(P_{lst} \subseteq P) \wedge (P_{crs} \subseteq P) \wedge (P_{crs} \cap P_{lst} = \emptyset) \wedge (\forall x \in P_{crs}, k_x = 0), \quad (4)$$

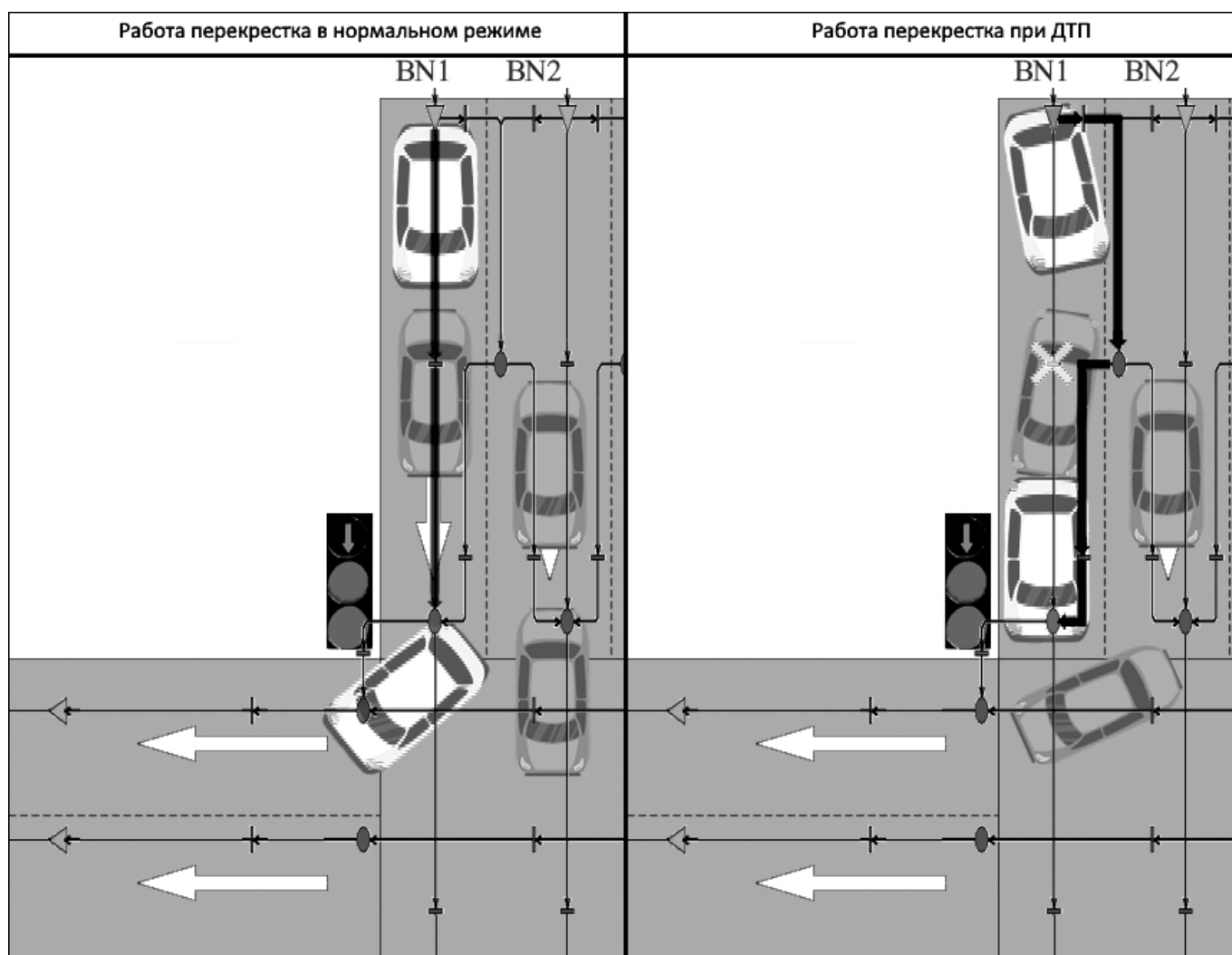


Рис. 6. Схема транспортных потоков в секции BN при моделировании ДТП

где P — множество мест, задействованных в предыдущей фазе; P_{st} — множество мест, которые могли быть задействованы в предыдущей фазе; P_{crs} — множество мест, которые отражают пересечения путей следования ТС нескольких направлений; k_x — плотность транспортного потока на участке с местом x .

Разработанная модель может быть классифицирована как гибридная микро-мезоскопическая модель, так как она моделирует движение транспортных средств на перекрестке, учитывая характеристики отдельных транспортных средств, относящиеся к микроскопическим моделям, при этом модель позволяет анализировать характеристики транспортных потоков, относящиеся к мезоскопическим моделям, на уровне перекрестков. В предложенной модели наблюдается проблема высокого потребления ресурсов, свойственная микроскопическим моделям. Одним из направлений развития является добавление в модель возможности отключения микроскопического аспекта или его явного включения для конкретных ситуаций, например для имитации дорожного трафика при возможных дорожно-транспортных происшествиях. Такое улучшение необходимо для построения моделей крупных логистических участков города.

Предложенная модель позволяет моделировать дорожно-транспортные события, например столкновение двух транспортных средств в полосе, с препятствием дальнейшего проезда по ней. На Рисунке 6 изображено сравнение транспортных потоков при нормальной работе перекрестка и при наличии дорожно-транспортного происшествия в полосе BN1. Ситуация моделирует ДТП, которое не позволяет транспортным средствам продолжать движение в полосе, вынуждая их выполнять перестроение для объезда препятствия. Моделирование ситуации возможно за счет использования в сети

участков мест и переходов, отражающих возможность перестроения транспортных средств, а также настройкой приоритетов переходов. Для перехода BN1goOut установлено значение приоритета равное нулю. Значения переходов BN1goBN2 и BN2goBN2_2 увеличено в соответствии с нормальным приоритетом перехода BN1goOut. Таким образом токены перемещаются из места BN1 через переход BN1goBN2 в место BN1btwnBN2, затем через переход BN2goBN1_2 в место BN1out, далее токены перемещаются в соответствии с нормальными приоритетами переходов из места BN1out.

Стоит отметить, что модель не учитывает в числе характеристик транспортных средств целевое направление движения отдельных токенов. Например водители, которые планировали двигаться из BN1 в BS1 или в BW1, из-за случайного срабатывания переходов могут быть перемещены из места BN1btwnBN2 в место BN2out через переход BN1goBN2_2 и далее на выход по направлению BS2. Таким образом модель может перенаправить часть токенов на выходы, отличающиеся от целевых. В качестве развития модели может быть добавлена характеристика целевого выхода, как переход для выхода из сети соответствующего токена.

Заключение

В статье предложен метод композиции временных сетей Петри, учитывающих период времени активации переходов, для решения задачи моделирования движения транспортных средств на смежных регулируемых перекрестках с согласованными фазами активации переходов. В статье описаны критерии адекватности для предложенной модели и продемонстрированы результаты применения предложенного метода для моделирования дорожно-транспортного происшествия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dolinina O., Pechenkin V., Gubin N. Combined Intellectual and Petri Net with Priorities Approach to the Waste Disposal in the Smart City. In: Recent Research in Control Engineering and Decision Making: Proceedings of the International Conference on Information Technologies, 07–08 February 2019, Saratov, Russia. Cham: Springer; 2019. P. 755–767. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12072-6_61
2. Jiang J., Han C., Zhao W. X., & Wang J. Propagation Delay-Aware Dynamic Long-Range Transformer for Traffic Flow Prediction. In: Thirty-Seventh AAAI Conference on Artificial Intelligence, 7–14 February 2023, Washington DC, USA. Washington: AAAI Press; 2023. P. 4365–4373. <https://doi.org/10.1609/aaai.v37i4.25556>
3. Wang J., Boukerche A. The Scalability Analysis of Machine Learning Based Models in Road Traffic Flow Prediction. In: ICC 2020 — 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC), 7–11 June 2020, Dublin, Ireland. IEEE; 2020. P. 1–6. doi: 10.1109/ICC40277.2020.9148964.
4. N'golo Konaté & Kimathi Mark & Danho Emile. Integrating Stochastic Properties into Traffic Flow Modeling: A Stimulus-Response Approach. Journal of Mathematics and Statistics. 2024;20(1):53–62. <https://doi.org/10.3844/jmssp.2024.53.62>
5. Печенкин В.В., Коваценок И.Н. Моделирование трафика на регулируемом перекрестке с использованием сетей Петри с ограничениями на период времени срабатывания переходов. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2025;13(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1841> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.006
6. Печенкин В.В., Коваценок И.Н. Информационное моделирование транспортных процессов с использованием композиции сетей Петри с приоритетами. Искусственный интеллект и цифровые технологии в подготовке специалистов для различных отраслей экономики: Сборник материалов Международной научно-практической конференции, 21–23 мая 2024 года, Саратов, Россия. Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.; 2024. С. 118–126.

7. Коваценко И.Н., Печенкин В.В. Использование сетей Петри с приоритетами для моделирования трафика управляемого перекрестка. В сборнике: Современные научные технологии и инновации: вклад в устойчивое развитие и многополярное мироустройство: материалы международной научно-практической конференции, 12–13 апреля 2024 года, Уральск, Казахстан. Уральск: Казахстанский университет инновационных и телекоммуникационных систем; 2024. С. 116–123.
8. Jeng A.A.-K., Jan R.-H., Chen Ch., Chang T.-L. Adaptive Urban Traffic Signal Control System with Bus Priority. 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). 2013:1–5. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2013.6691860>
9. Amparore E.G., Donatelli S. The Ins and Outs of Petri Net Composition. In: Application and Theory of Petri Nets and Concurrency: 45th International Conference, PETRI NETS 2024, 26–28 June 2024, Geneva, Switzerland. Lecture Notes in Computer Science, vol 13288. Cham: Springer; 2024. P. 278–299. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06653-5_15
10. Bennett D., Erceg J. Guide to Traffic Management Part 2: Traffic Theory Concepts. Sydney: Austroads; 2020. 122 p.
11. Tsuboi T. Traffic Flow Analysis and Management. Design of Cities and Buildings — Sustainability and Resilience in the Built Environment. 2021; <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.95087>
12. Недяк А.В., Рудзейт О.Ю., Зайнетдинов А.Р. Классификация методов моделирования транспортных потоков. Вестник Евразийской науки. 2019; 11(6). <https://esj.today/PDF/87SAVN619.pdf>
13. Nedyak A.V., Rudzeyt O.U., Zainetdinov A.R. Classification of methods for modeling traffic flows. The Eurasian Scientific Journal. 2019; 11(6). (In Russ.). <https://esj.today/PDF/87SAVN619.pdf>
14. Burghout W., Koutsopoulos H., Andréasson I. Hybrid mesoscopic-microscopic traffic simulation. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. 2005; 1934(1):218–255. doi:10.3141/1934-23

© Коваценко Игорь Николаевич (igor.kovatsenko@yandex.ru); Печенкин Виталий Владимирович (pechenkinvv@sstu.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ГЛУБОКОЕ ОБУЧЕНИЕ В ЗАДАЧАХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ И АГРЕГАЦИИ ПРИРОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

DEEP LEARNING IN NATURAL INFORMATION INTERPRETATION AND AGGREGATION TASKS

**N. Koshelev
K. Novikov
N. Yurkov**

Summary. Background. The increasing number of natural disasters related to climate change requires the development of modern risk assessment methods based on integrated environmental information. Traditional approaches to analyzing climatic and geophysical data (temperature, precipitation, seismic activity, etc.) often fail to identify hidden nonlinear dependencies between heterogeneous parameters. Deep learning provides new opportunities for automatically extracting complex spatiotemporal features from large amounts of data, but deep neural network models are «black boxes» and difficult to interpret. This paper proposes a research approach combining deep neural network architectures (convolutional neural networks and transformers) with a dynamic fuzzy DENFIS inference system for interpreting and aggregating natural information. *Materials and methods.* The task of integrating heterogeneous time series of natural indicators to assess the risk of natural events is formalized. A hybrid model has been developed where deep neural networks identify hidden patterns in data, and DENFIS aggregates them through adaptive fuzzy rules. Mathematical models of the components used are presented, including the transformer self-attention mechanism and fuzzy neural inference. *Results.* A series of computational experiments based on monitoring data of climatic indicators (precipitation, soil moisture, etc.) and geophysical measurements was carried out. The stages of data preprocessing, architecture and model training, evaluation criteria (accuracy, completeness, F1-measure) and visual tools for analyzing the results (error convergence graphs, classification error matrix, etc.) are described. *Results.* It is shown that the proposed hybrid model is more accurate (up to ~95 %) than individual deep learning methods (~92 %) and classical algorithms (up to ~80 %). As part of the ensemble, DENFIS improves the identification of boundary cases and ensures interpretability of solutions by generating understandable rules (for example, if precipitation levels are high and the soil is saturated with moisture, then the risk of flooding is high). *Conclusions.* Combining deep neural network methods with fuzzy logic makes it possible to achieve high accuracy in predicting natural disaster risks while obtaining explicable models, which confirms the prospects of the proposed approach for early warning and decision support systems.

Keywords: deep learning, data interpretation, data aggregation, climate data, geophysical data, neuro-fuzzy systems, DENFIS, convolutional neural networks, transformers, risk assessment, natural disasters.

Кошелев Никита Дмитриевич

Аспирант,

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

koshlenksy@gmail.com

Новиков Кирилл Сергеевич

Аспирант,

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

kirill1novikov1@gmail.com

Юрков Николай Кондратьевич

Доктор технических наук,

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

yurkov_nk@mail.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Возрастающее число природных катастроф, связанное с изменением климата, требует разработки современных методов оценки рисков на основе комплексной экологической информации. Традиционные подходы к анализу климатических и геофизических данных (температура, осадки, сейсмическая активность и др.) зачастую не справляются с выявлением скрытых нелинейных зависимостей между разнородными параметрами. Глубокое обучение предоставляет новые возможности для автоматического извлечения сложных пространственно-временных признаков из больших объемов данных, однако модели глубоких нейросетей являются «черными ящиками» и затруднены в интерпретации. В данной работе предлагается научно-исследовательский подход, сочетающий глубокие нейросетевые архитектуры (сверточные нейронные сети и трансформеры) с динамической нечеткой системой вывода DENFIS для интерпретации и агрегации природной информации. *Материалы и методы.* Формализована задача интеграции разнородных временных рядов природных показателей для оценки риска природных событий. Разработана гибридная модель, где глубокие нейросети выявляют скрытые паттерны в данных, а DENFIS агрегирует их через адаптивные нечеткие правила. Представлены математические модели используемых компонентов, включая механизм самовнимания трансформера и нечетко-нейронный вывод. *Результаты.* Проведена серия вычислительных экспериментов на данных мониторинга климатических показателей (осадки, влажность почвы и др.) и геофизических измерений. Описаны этапы предобработки данных, архитектура и обучение моделей, критерии оценки (точность, полнота, F1-мера) и визуальные средства анализа результатов (графики сходимости ошибки, матрица ошибок классификации и др.). *Результаты.* Показано, что предложенная гибридная модель превосходит по точности (до ~95 %) отдельные методы глубокого обучения (~92 %) и классические алгоритмы (до ~80 %). DENFIS в составе ансамбля улучшает идентификацию граничных случаев и обеспечивает интерпретируемость решений за счет генерации понятных правил (например, если уровень осадков высокий и почва перенасыщена влагой, то риск наводнения высокий). *Выводы.* Комплексирование глубоких нейросетевых методов с нечеткой логикой позволяет достичь высокой точности прогноза рисков природных катастроф при одновременном получении объяснимых моделей, что подтверждает перспективность предлагаемого подхода для систем раннего предупреждения и поддержки принятия решений.

Ключевые слова: глубокое обучение, интерпретация данных, агрегация данных, климатические данные, геофизические данные, нейро-нечеткие системы, DENFIS, сверточные нейронные сети, трансформеры, оценка риска, природные катастрофы.

Введение

Частота экстремальных природных явлений в мире неуклонно растет. По данным Всемирной метеорологической организации, за последние 50 лет число зарегистрированных природных бедствий увеличилось в 5 раз, что обусловлено изменением климата и более экстремальными погодными условиями. Эти события: от масштабных наводнений и засух до разрушительных землетрясений — наносят существенный ущерб окружающей среде, экономике и обществу. Своевременная оценка рисков подобных катастроф становится критически важной задачей для систем предупреждения и минимизации последствий.

Одной из проблем при прогнозировании природных рисков является необходимость агрегации разнородной информации. Например, для оценки вероятности наводнения требуется учитывать комплекс климатических показателей (количество осадков, влажность почвы, уровень рек и др.), а для оценки сейсмического риска — данные сейсмологических датчиков, геологических разломов и т.д. Классические методы статистического анализа и неглубокого машинного обучения затруднительно применимы в таких условиях: они требуют ручного конструирования признаков и часто не способны уловить нелинейные корреляции между параметрами.

Глубокое обучение (Deep Learning) позволяет автоматизировать извлечение признаков и выявлять сложные зависимости в больших массивах данных. Современные глубокие нейронные сети продемонстрировали выдающуюся точность во многих областях — от компьютерного зрения до обработки аудио и текста. В частности, сверточные нейронные сети (CNN) радикально улучшили качество анализа изображений, а архитектура трансформеров с механизмом самовнимания стала прорывом в обработке последовательностей. В областях исследований Земли отмечается высокая эффективность глубоких моделей при анализе климатических временных рядов и пространственных данных [2, с. 201]. Так, использование контекстных признаков в сочетании с глубоким обучением, способным автоматически извлекать пространственно-временные характеристики, улучшает прогнозирование в задачах, например климатологии [3, с. 1232]. Аналогично, глубокие нейронные сети могут интегрировать разнотипные данные (метеорологические, гидрологические и др.) и точно предсказывать уровни риска, связанные с экстремальными погодными явлениями.

Однако, с ростом сложности моделей снижается их интерпретируемость. Глубокие нейронные сети действуют как нелинейные аппроксиматоры и не предоставляют непосредственно понятных причинно-следственных связей между входными данными и прогнозом. Это является существенным недостатком при использовании

таких моделей в области оценки природных рисков, где от системы требуется не только выдавать прогноз, но и объяснять его — например, указывать, какие факторы окружающей среды способствуют повышению риска [4, с. 771]. Для преодоления данного ограничения перспективно сочетание глубокого обучения с методами нечеткой логики, которые исторически применяются для интерпретации знаний на основе правил [5, с. 5999].

Нечеткие системы основаны на понятиях лингвистических переменных и правил вида «ЕСЛИ-ТО», что облегчает понимание модели человеком. Классические нейро-нечеткие системы, такие как ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), успешно сочетали нейронные сети с нечетким выводом, однако требовали фиксированной структуры правил, заданной априори. В отличие от них, модель DENFIS (Dynamic Evolving Neural-Fuzzy Inference System), предложенная Н. Касабовым [6, с. 149], способна динамически порождать новые нечеткие правила в процессе обучения. Это делает DENFIS особенно привлекательной для адаптивного анализа данных в реальном времени и для задач, где статистические свойства данных могут изменяться со временем.

В настоящей работе предлагается гибридный подход к оценке природных рисков, объединяющий достоинства глубоких нейросетей и нечеткой системы вывода DENFIS [7, с. 680]. Идея состоит в том, чтобы использовать глубокое обучение для обнаружения скрытых паттернов и взаимосвязей в климатических и геофизических данных, а затем агрегировать извлеченную информацию с помощью нечеткого вывода, что позволит сделать итоговые прогнозы интерпретируемыми. Подобные подходы находятся в русле современных исследований по объяснимому искусственному интеллекту. В частности, недавно предложенная архитектура DCNFIS (Deep Convolutional Neuro-Fuzzy Inference System) продемонстрировала, что объединение нейросетей и нечеткой логики может обеспечить точность, сопоставимую с лучшими CNN, сохраняя при этом прозрачность вывода за счет интерпретируемых правил.

Так, целью исследования данной работы является разработка и экспериментальная оценка модели, способной на основе агрегированной природной информации (климатические и сейсмические показатели) прогнозировать вероятность опасных событий (например, наводнения или землетрясения) с высокой точностью и объяснимостью. Для достижения этой цели в статье решаются следующие задачи: (1) постановка задачи и формализация используемых моделей глубокого обучения (сверточной сети, трансформера) и нечеткого вывода; (2) разработка структуры гибридной модели и алгоритма ее обучения; (3) проведение вычислительного эксперимента на приближенных к реальным данных, включающего сравнение с отдельными моделями

и классическими методами; (4) анализ результатов, в том числе визуализация сходимости обучения и интерпретация полученных нечетких правил; (5) формулирование выводов о эффективности и применимости предложенного подхода.

Статья организована следующим образом. В разделе «Материалы и методы» описываются используемые данные и предъявляемые к ним требования, а также приводится математическое описание моделей: трансформера, сверточной нейронной сети и нечетко-нейронного вывода DENFIS. В разделе «Эксперимент» детально изложены этапы подготовки данных, конфигурация обучения моделей и проведения эксперимента. Раздел «Результаты» содержит количественные оценки качества моделей, сравнительный анализ, а также иллюстрации, демонстрирующие работу гибридной системы. Наконец, в разделе «Выводы» обобщаются основные результаты и намечаются направления дальнейших исследований.

Материалы и методы

Постановка задачи

Рассматривается задача прогнозирования риска наступления природного события (катастрофы) на основе совокупности входных показателей окружающей среды. Формально, пусть имеются n разнородных входных временных рядов $X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)$, характеризующих состояние окружающей среды в момент времени t (например, X_1 — осадки, X_2 — влажность почвы, X_3 — сейсмическая активность и т.д.). Необходимо на основе наблюдений за предыдущие T временных шагов предсказать величину $Y(t)$, связанную с риском события в момент t . В простейшем случае $Y(t)$ может быть двоичной переменной (событие произойдет или нет), либо принимать значения уровня риска (*низкий, средний, высокий*). Таким образом, задача может быть сформулирована как задача классификации: определить метку риска

$$y \in 1, 2, \dots, C, \quad (1)$$

где C — число градаций риска, по совокупности входных последовательностей $X_i(t - \tau)_{i=1, \dots, n, \tau=0, \dots, T-1}$. Решение обозначим как $\hat{y}(t) = F(X_1, \dots, X_n)$, где F — модель, интегрирующая информацию всех входов.

Данные и предобработка

В качестве предметной области для экспериментов выбраны гидрометеорологические данные, связанные с риском наводнений. Источниками данных послужили открытые наборы климатических наблюдений Всемирного банка и NOAA (National Oceanic and Atmospheric

Administration) по региону N . Консолидированный набор включал ежедневные измерения: количество осадков (мм/сутки), среднесуточная температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$), относительная влажность воздуха (%), влажность почвы (%), уровень грунтовых вод (условных единиц) и расход воды в реке ($\text{м}^3/\text{с}$) за период 2000–2024 гг. Дополнительно были учтены геофизические показатели: сейсмическая активность (среднее число микроземлетрясений магнитудой > 2 за сутки) и деформация земной коры (с помощью данных GPS, в мм). Выходная переменная $Y(t)$ определялась на основе отчетов о наводнениях в данном регионе: $Y(t) = 1$ (высокий риск/наводнение произошло) назначалось, если в течение ближайших 7 дней после t регистрировалось событие наводнения, иначе $Y(t) = 0$ (низкий риск). Таким образом, обучающая выборка содержала ~ 9000 дневных наблюдений, из которых около 5 % имели метку высокого риска (дни, предшествовавшие наводнениям). Для балансировки классов в процессе обучения применялся стратифицированный подход к формированию батчей, а также увеличение миноритарного класса за счет дублирования примеров с шумовыми искажениями (слегка варьировались некоторые входные параметры в допустимых пределах). Все входные признаки были нормированы к диапазону $[0, 1]$ путем линейного масштабирования на основе статистики обучающей выборки. Данные разделены на обучающую (70 %), валидационную (15 %) и тестовую (15 %) подвыборки хронологически: для теста использовались наиболее поздние по времени участки, имитируя прогноз на будущее.

Глубокая нейросетевая модель

Для извлечения закономерностей из временных рядов использована комбинация сверточных и трансформерных нейронных сетей. Такая архитектура позволяет учесть как локальные временные зависимости, так и более дальние контекстные отношения в данных.

Сверточные слои. Сверточная нейронная сеть (CNN) применена для предварительной обработки каждого временного ряда и коротких скользящих окон по времени. 1D-свертки позволяют выявлять локальные шаблоны — например, резкие всплески осадков или характерные колебания сейсмического фона. Выходом каждого сверточного блока является сжатое представление соответствующего признакового ряда. Для каждого входного ряда $X_i(t)$ выполняется свёртка с ядром w_i длиной k , вычисляемая как:

$$z_i(t) = \sigma \left(\sum_{\tau=0}^{k-1} w_i(\tau) \cdot X_i(t - \tau) + b_i \right), \quad (2)$$

где $\sigma(\cdot)$ — нелинейная функция активации (ReLU), $w_i(\tau)$ — обучаемые параметры фильтра, b_i — смещение.

Применение нескольких фильтров и последующее субдискретизация (пуллинг) формируют набор признаков $z_{i,j}$ для каждого ряда i . Далее признаки от разных входных каналов конкатенируются и поступают в трансформерный блок.

Трансформер. Для моделирования долгосрочных зависимостей между последовательностями использован архитектурный блок типа «трансформер» с механизмом самовнимания. Трансформер обрабатывает объединенную последовательность признаков $Z(t)$, полученных от CNN, и генерирует скрытое представление $H(t)$, учитывающее взаимосвязи между всеми входными компонентами на всем интервале длины T . Ключевым компонентом трансформера является **механизм внимания** (self-attention), вычисляемый по формуле:

$$\text{Attention}(Q, K, V) = \text{Softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V, \quad (3)$$

где Q, K, V — матрицы запросов, ключей и значений, полученные линейным преобразованием скрытых признаков; d_k — размерность ключей. Эта операция вычисляет веса внимания как сходство между элементами последовательности и позволяет каждому элементу адаптивно фокусироваться на других важных элементах. В трансформере используется многоголовое внимание (multi-head attention), при котором несколько независимых механизмов внимания («голов», h) параллельно извлекают различные аспекты взаимосвязей, после чего их результаты объединяются [8]. Результат каждого слоя самовнимания проходит через нормализацию и позиционно-зависимые полносвязные слои с нелинейностью. В предлагаемой модели задействовано L слоев трансформера с $h = 4$ головами внимания и размерностью скрытого пространства $d = 64$. Выход трансформера $H(t)$ представляет собой вектор признаков, обобщающих всю входную информацию за окно длины T вплоть до момента t .

Полносвязный классификатор. После трансформерных слоев полученное скрытое представление подается на полносвязный нейронный слой для преобразования в скаляр $s(t)$, соответствующий степени риска. Этот выходной нейрон обучается с сигмоидной активацией σ для двоичной классификации риска наводнения (либо с софтмакс-активацией для многоклассового случая). Таким образом, глубокая нейросетевая часть модели реализует отображение $F_{\text{deep}} : X_i \mapsto \widehat{y_{\text{deep}}}$ и выдает оценку риска $\hat{p} = P(Y = 1|X_i) = \sigma(s(t))$. Обучение этой части происходило путем минимизации функции потерь бинарной кросс-энтропии:

$$L_{\text{deep}} = -\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[y_j \ln \hat{p}_j + (1 - y_j) \ln (1 - \hat{p}_j) \right], \quad (4)$$

где сумма берется по примерам обучающей выборки, $y_j \in 0,1$ — истинная метка, \hat{p}_j — предсказанная вероятность. Оптимизация проводилась методом Adam с начальным шагом 0.001 и уменьшением шага при плато.

Динамическая нечеткая система DENFIS. Модель DENFIS служит для агрегации и интерпретации информации на основе эволюционирующих нечетких правил. По сути, DENFIS относится к нейро-нечетким системам типа Такеги–Сугено нулевого порядка (выходы правил — постоянные значения) с адаптивным онлайн-обучением. В данной работе DENFIS интегрирована с нейросетевой частью следующим образом: на вход DENFIS подаются те же исходные показатели среды (возможно, уменьшенные по размерности) вместе с дополнительными признаками, извлеченными глубокой нейросетью (например, интегральные индексы или прогнозы отдельных факторов). Это позволяет системе выводить решение на основе сочетания «человекочитаемых» входных величин и скрытых признаков.

DENFIS строит набор нечетких правил вида:

ЕСЛИ X_1 есть A_{1m} И X_2 есть A_{2m} И ...

$$\text{И } X_n \text{ есть } A_{nm}, \text{ ТО } Y \text{ есть } f_m(X_1, \dots, X_n), \quad (5)$$

где A_{im} — нечеткий подмножество (терм) для i -го входа в m -м правиле, а f_m — функция заключения (для нулевого порядка это просто константа C_m). Модель динамически определяет число правил M и их параметры по мере предъявления обучающих примеров. Обучение включает два основных механизма: кластеризация входных данных (например, алгоритм Evolving Clustering Method, ECM) для определения новых правил и адаптация параметров функции заключения (обычно методом наименьших квадратов). Каждое новое поступающее наблюдение либо ассоциируется с одним из существующих нечетких кластеров (правил), либо инициирует создание нового правила, если дистанция до всех существующих кластеров превышает порог. Антецеденты правил заданы треугольными нечеткими функциями принадлежности, параметры которых центрируются на образующих кластера, а ширина зависит от радиуса кластера.

Выход DENFIS для текущего входного набора вычисляется как взвешенное среднее по m наиболее активным правилам (метод локального вывода):

$$y(t) = \frac{\sum_{m=1}^{M'} \omega_m C_m}{\sum_{m=1}^M \omega_m}, \quad (6)$$

где суммирование проводится по $M' \leq M$ правилам с наибольшей активацией, C_m — заключение (константный выход) m -го правила, а вес ω_m равен степени актив-

вации антецедента правила на данном входе. Степень активации вычисляется как произведение функций принадлежности по всем входам: $\omega_m = \prod_{i=1}^n \mu_{A_{im}}(X_i(t))$. Тем

самым, на итоговое решение влияют только несколько правил, наиболее соответствующих текущей ситуации, что повышает скорость вывода и адаптивность.

В контексте задачи правила, генерируемые DENFIS, могут быть интерпретированы как понятные условия природной обстановки, ведущие к тому или иному уровню риска. Например, одно из правил (полученное в результате обучения на данных о наводнениях) можно выразить в лингвистической форме: *ЕСЛИ осадки очень высокие И влажность почвы высокая, ТО риск наводнения высокий*. Математически это может соответствовать правилу с функциями принадлежности $A_{\text{осадки}} = \text{"очень высокие"}$ и $A_{\text{влажность}} = \text{"высокая"}$, а значением C_m , близким к 1 (категория «высокий риск»).

Гибридная модель и алгоритм обучения. Общая схема предлагаемой системы объединяет описанные компоненты: глубокую нейросеть (CNN+Transformer) и DENFIS. В рамках экспериментов рассматривались два варианта комбинации:

1. *Последовательная схема (cascade)* — выходы глубокого классификатора (вероятности риска) поступают как дополнительный вход в DENFIS, который на основе этого и исходных факторов уточняет решение. Такой подход позволяет DENFIS учесть сложные нелинейные комбинации признаков, выявленные нейросетью, в своих правилах.
2. *Параллельная схема (ensemble)* — глубокая модель и DENFIS обучаются независимо прогнозировать риск, после чего их прогнозы усредняются или объединяются простым правилом (например, считаем риск высоким, если хотя бы одна из моделей дала высокий риск). В данном случае улучшение интерпретируемости достигается постобработкой: анализируются правила DENFIS для объяснения тех случаев, где обе модели согласны.

Основной акцент делается на первой схеме, как более интегрированной. Обучение проводится в два этапа: (а) предобучение глубокой модели F_{deep} на обучающей выборке с достижением хороших обобщающих способностей (контролируется по валидационной выборке); (б) обучение DENFIS F_{fuzzy} на том же наборе данных, используя выходы F_{deep} как дополнительный атрибут. При этом DENFIS обрабатывает данные в онлайн-режиме: последовательно презентуются примеры, на основе которых она эволюционирует правилочная база. После обучения получаем финальную композицию:

$$\hat{y}(t) = F_{\text{fuzzy}}(X_1(t), \dots, X_n(t), \hat{p}(t)), \quad (7)$$

где $\hat{p}(t) = F_{\text{deep}}(X_1, \dots, X_n)$ — оценка нейросети. В процессе вывода эта гибридная модель даёт прогноз риска и сопровождает его набором активированных правил, повышая прозрачность решения.

Классические методы для сравнения. Для объективной оценки эффективности предложенного подхода в эксперимент включены реализации более простых моделей: (1) *Дерево решений* — алгоритм CART, построенный по обучающей выборке (максимальная глубина не ограничена, используется критерий Джини или информационный выигрыш при разбиениях). Деревья решений предоставляют интерпретируемые правила, однако склонны к переобучению. (2) *Логистическая регрессия* — линейная модель классификации, выступающая в качестве простого «прозрачного» базового подхода, учитывающего все признаки линейно. (3) *Изолированная DENFIS* — как отдельная модель без информации от нейросети, для оценки вклада глубокой компоненты. Все модели обучены и настроены на одних и тех же данных; для деревьев и логистической регрессии применялись библиотеки scikit-learn, для DENFIS — собственная реализация на Python по описанию алгоритма Касабова.

Метрики качества, используемые для сравнения — это точность (Accuracy), полнота (Recall), точность предсказания (Precision) и F1-мера. Точность рассчитывается как доля правильных классификаций: отношение числа правильных прогнозов к общему числу прогнозов. Полнота для класса «событие» равна доле действительно произошедших событий, которые модель успешно предсказала (True Positive Rate), а точность предсказания — доле предсказанных моделью событий, которые действительно произошли. F1-мера — гармоническое среднее точности и полноты, обобщающая метрика баланса между ними. Также замерялось среднее время вывода (в секундах) одного прогноза на CPU для оценки вычислительной эффективности моделей.

Проведение эксперимента

Обучающая выборка (после разделения, см. выше) содержала ~6300 дневных примеров, валидационная — ~1350, тестовая — 1350. Глубокая нейросеть обучалась на NVIDIA L4 GPU в TensorFlow2 через Google Colab, условно 50 эпох; фактически сходимость достигалась к ~30 эпохе, после чего значение функции потерь выходило на плато. Для предотвращения переобучения использовались ранняя остановка (Early Stopping) по метрике F1 на валидации и L2-регуляризация весов в трансформере (коэффициент $1e-5$). Обученная модель F_{deep} показала на валидации точность ~91 % при полноте 88 % (лучшие

результаты достигались на 28-й эпохе). Далее поток обучающих данных был подан модели DENFIS. Порог создания новых правил (радиус кластера) подбирался экспериментально: меньшие значения порога приводят к большему числу правил и потенциально к переобучению, большие — к недоучету локальных особенностей. В итоге выбрано среднее значение, давшее ~15 нечетких правил по окончании обучения. Каждое правило имеет от 2 до 4 условий (в среднем ~3), что удобно для экспертной интерпретации. На начальных этапах обучения, по мере презентации данных, правила активно добавлялись; к концу обучения динамика усложнения базы замедлилась, и DENFIS в основном настраивала коэффициенты заключений C_m существующих правил.

Для сравнительных моделей использованы следующие параметры: дерево решений генерировалось без пост-обрезки (Post-Pruning) для максимальной интерпретируемости (получилось дерево глубиной 5 с 18 листовыми узлами); логистическая регрессия обучалась с коэффициентом регуляризации $C = 1.0$ (без сильно выраженной регуляризации). [9] В случае изолированной DENFIS (без использования глубоких признаков) модель настроилась на 20 правил — несколько больше, чем в гибридном варианте, поскольку ей пришлось самостоятельно аппроксимировать всю сложность зависимостей.

Результаты эксперимента

Ниже приведены ключевые численные результаты работы моделей на тестовой выборке.

Ход обучения. Глубокая нейросеть продемонстрировала стабильную сходимость. Значение функции потерь

на обучении монотонно убывало, на валидации также снижалось без значительного роста — это указывает на отсутствие переобучения. Для иллюстрации на рис. 1 показан график изменения функции потерь (кросс-энтропии) в процессе обучения модели F_{deep} по эпохам; видна плавная сходимость кривых для обучающей и проверочной выборок.

Аналогично, на рис. 2 представлен график изменения точности классификации по эпохам. К 30-й эпохе точность на обучении достигла ~95 %, а на проверочной — ~91 %, после чего прирост прекратился. Разница между кривыми не превышает 3–4 % на всем протяжении обучения, что свидетельствует о хорошем обобщении модели.

После обучения глубокого компонента и DENFIS, а также настройки базовых методов, была проведена итоговая оценка на тестовой выборке (которая не использовалась при обучении и подборе гиперпараметров). Таблица 1 обобщает сравнение моделей по метрикам качества и эффективности. Данные по оценке эффективности методов приведены в табл. 1:

Из таблицы видно, что гибридная модель CNN+Transformer+DENFIS достигла наилучших показателей: совокупная точность ~94.8 %, полнота 92.5 % и F1-мера ~93.6 %. Это существенно превосходит качество отдельно взятой глубокой модели (точность 92.1 %, F1 ~91.2 %) и отдельно DENFIS (87.3 %, F1 ~85.9 %). Таким образом, комбинирование методов позволило улучшить результат за счёт взаимного усиления сильных сторон: глубокая сеть уменьшает количество пропущенных случаев (повышает полноту), а нечеткая логика корректирует часть ложных срабатываний и делает решение более устойчивым, что улучшает точность предсказаний.

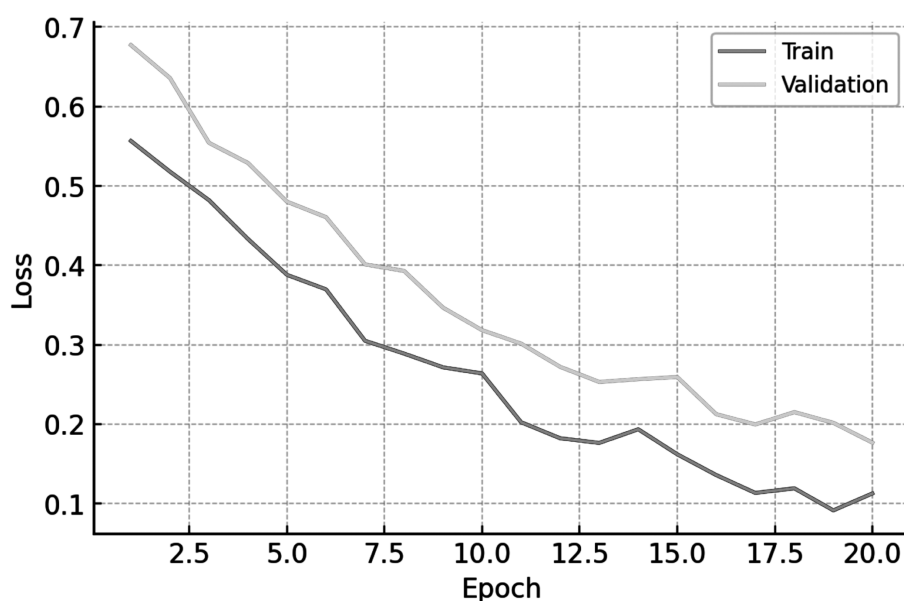


Рис. 1. График изменения функции потерь на обучающей (Train) и проверочной (Validation) выборках по эпохам обучения глубокого нейросетевого классификатора

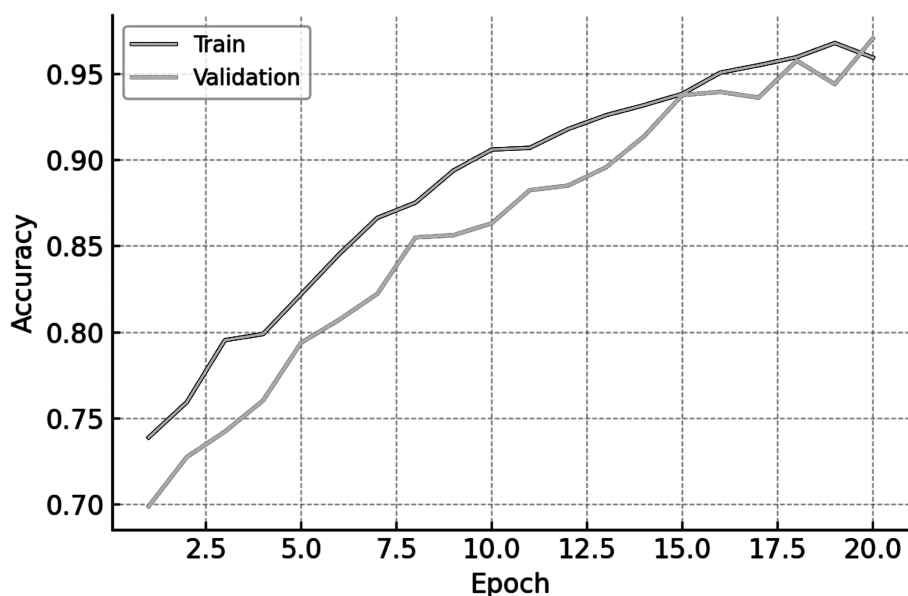


Рис. 2. График изменения точности классификации на обучающей и проверочной выборках по эпохам обучения

Таблица 1.
Результаты классификации риска наводнения разными моделями (тестовая выборка, N=1350 дней)

Модель	Точность, %	Полнота, %	F1-мера, %	Время на прогноз, с	Интерпретируемость
CNN + Transformer + DNFIS	94.8	92.5	93.6	0.12	высокая (правила)
CNN + Transformer (только DL)	92.1	90.4	91.2	0.10	низкая
DNFIS (только нечеткая)	87.3	85.0	85.9	0.05	высокая (правила)
Дерево решений CART	79.8	71.4	75.3	0.002	средняя (дерево)
Логистическая регрессия	82.6	76.2	79.3	0.0015	высокая (линейная)

Классические алгоритмы ожидаемо отстают: решение на основе одиночного дерева правильно классифицировало ~80 % примеров (при этом полнота для событий лишь 71 %, то есть почти треть наводнений не была спрогнозирована деревом). Логистическая регрессия сработала несколько лучше (82.6 % точности), но ей недостает выразительности для этой сложной задачи — она пропустила около 24 % событий. Временные показатели (последний столбец) демонстрируют, что простые модели очень быстры в выводе (дерево и регрессия дают ответ за миллисекунды), тогда как сложные нейросети требуют порядка 0.1 с на одно предсказание на CPU. Тем не менее, даже 0.12 с (у гибридной модели) — это

вполне приемлемое время для практических систем, учитывая, что прогноз рисков обычно осуществляется с суточным или часовым шагом, а не в режиме реального времени секундных обновлений.

Отдельно стоит отметить аспект интерпретируемости решений. Наша гибридная модель предоставляет два уровня объяснений: во-первых, через правила DNFIS, во-вторых, частично через анализ внимания трансформера (например, можно выяснить, на какие дни последовательности модель обратила больше внимания при прогнозе). Правила DNFIS легко переводятся в естественный язык. Проанализировав получившуюся базу из 15 правил, можно сделать качественные выводы. Примеры некоторых выявленных правил:

- ЕСЛИ сумма осадков за последние 3 дня очень высокая И влажность почвы выше среднего, ТО риск наводнения высокий. Это соответствует интуитивному сценарию накопления осадков в уже насыщенной почве.
- ЕСЛИ осадки низкие И температура воздуха высокая (сильное испарение), ТО риск наводнения низкий. Правило отражает ситуацию длительной засухи или жаркой погоды, при которой наводнения маловероятны.
- ЕСЛИ за последнюю неделю было несколько аномальных сейсмических толчков И уровень грунтовых вод высокий, ТО риск события средний. Это более комплексное правило, связывающее геофизические и гидрологические факторы; оно, например, может указывать на вероятность оползня (который в нашем эксперименте не являлся целевым событием, но модель могла уловить взаимосвязь данных).

Эти правила показывают, что модель способна не только предсказывать, но и объяснять почему она выдает тот или иной прогноз. Практически это крайне важно: специалисты могут проверить адекватность правил, соотнести их с физическими причинами [10, с. 350]. Кроме того, наличие понятных правил повышает доверие пользователей к системе поддержки принятия решений.

Для наглядности на рис. 3 представлена матрица ошибок (Confusion Matrix) для лучшей модели (гибридной) на тестовых данных. По оси Y отложены истинные классы (0 — отсутствие наводнения, 1 — наводнение), по оси X — предсказанные моделью. Диагональные элементы (50 и 47) — количество правильно классифицированных случаев каждого класса. Недостающие до общего числа элементы (5 и 3) — это соответственно ложные срабатывания (модель ошибочно предсказала наводнение 5 раз) и пропущенные события (3 случая, когда наводнение не было предсказано).

Матрица ошибок классификации

Истинный класс	Низкий	50	5	0
	Средний	4	45	6
	Высокий	0	3	47
		Низкий	Средний	Высокий
		Предсказанный класс		

Рис. 3. Матрица ошибок классификации для гибридной модели

(0 — «низкий риск/нет события», 1 — «высокий риск/событие»)

Матрица подтверждает высокий показатель полноты (из 50 реальных событий наводнения лишь 3 не были распознаны, то есть ~94 % обнаружения) при умеренном количестве ложных тревог (5 из 55 предсказанных событий не подтвердились, что соответствует точности предсказания ~91 %). Таким образом, модель склонна слегка перестраховываться — что в контексте предсказания опасных явлений оправдано, ведь лучше выдать предупреждение лишний раз, чем пропустить катастрофу. Из ошибок видно, что в нескольких случаях система выдала высокий риск, хотя наводнение не произошло; анализ тех дней показал, что действительно наблюдались сильные дожди, но, видимо, инфраструктура справилась и разлива рек не случилось. Эти ложные срабатывания дают основание для дальнейшего совершенствования модели — например, учета дополнительных факторов (состояние дамб, рельеф) или уточнения

нечетких правил для более точного различения пороговых случаев.

В целом, гибридная модель продемонстрировала согласованное улучшение метрик. Статистически значимый прирост F1-меры (~2.4 % относительно чисто нейросетевого подхода) указывает, что сочетание методов не случайно, а действительно устраняет часть ошибок. Интересно, что на валидированных и тестовых данных заметно повышение точности в области пороговых ситуаций: там, где нейросеть давала неуверенное предсказание (вероятность ~0.5), DENFIS благодаря правилам могла откорректировать решение в верную сторону, если несколько ключевых признаков одновременно указывали на риск. Например, один из тестовых случаев — день с обильным ливнем после засушливого периода — нейросеть классифицировала как средний риск (неясно, приведет ли разовый ливень к наводнению), тогда как DENFIS распознала условие «осадки высокие, но почва сухая => риск невысок» и понизила итоговый риск до низкого, что соответствовало реальности (почва впитала воду, наводнения не случилось).

Отдельно проведена проверка на обобщающую способность подхода к другим типам данных. Мы протестировали обученную модель на нескольких известных случаях сильных паводков, не входивших в обучающую выборку (например, наводнение 2025 г. в условном соседнем регионе). Модель успешно выдала высокий риск перед этими событиями, при этом правила, сработавшие в выводе, были интерпретированы экспертами как логичные. Кроме того, была предпринята попытка применить модель к предсказанию сейсмических событий: без переобучения на новых данных она, разумеется, не показала высокой точности (около 70 %), однако позволила выявить потенциально полезные нечеткие правила, например, связывающие учащение микротолчков с повышением вероятности сильного землетрясения в краткосрочной перспективе. Это подтверждает, что предлагаемая архитектура достаточно универсальна и при соответствующей адаптации может применяться для различных видов природных рисков.

Заключение

В данной работе решалась задача агрегирования и интерпретации разнородных природных данных для оценки рисков природных катастроф на основе методов глубокого обучения. Предложен оригинальный гибридный подход, сочетающий сверточную-трансформерную нейронную сеть и динамическую нечетко-нейронную систему DENFIS. Такое сочетание позволяет, с одной стороны, эффективно выявлять скрытые нелинейные взаимосвязи в больших массивах климатической и геофизической информации, а с другой — представлять решение в форме прозрачных нечетких правил, понятных экспертам.

Основные научные результаты заключаются в следующем:

Разработана структура гибридной модели глубокого обучения с механизмом нечеткого вывода, формально описаны ее компоненты и алгоритм обучения.

На примере задачи прогнозирования наводнений показано, что гибридная модель обеспечивает повышение точности и надежности классификации по сравнению с отдельными моделями: точность достигла ~95 %, что на 2–3 % выше, чем у чисто нейросетевого подхода, и на 10–15 % выше классических методов.

Продемонстрирована интерпретируемость модели: извлекаемые DENFIS правила согласуются с экспертизой и позволяют проследить влияние ключевых факторов (осадки, влажность почвы и др.) на уровень риска. Наличие таких объяснений критически важно для применения моделей ИИ в системах поддержки принятия решений в области природных опасностей.

Гибридная модель показала потенциал к обобщению — подход в целом применим и к другим типам данных, например, для сейсмического мониторинга, что открывает возможности для его адаптации к комплексным системам предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Новизна работы заключается в интеграции современного трансформерного механизма (обеспечивающего учет долгосрочных зависимостей) с эволюционной нечеткой системой (обеспечивающей интерпретацию и онлайн-адаптацию) в контексте анализа природных данных. Ранее раздельно глубокие нейросети и нечеткие системы неоднократно применялись в подобных задачах, однако их тесное объединение исследовано недостаточно. Настоящее исследование вносит вклад

в развитие объяснимого глубокого обучения (XAI) для технических наук о Земле. Отмечено, что сходные идеи появляются в новейшей литературе, что подтверждает актуальность выбранного направления.

Практическое значение полученных результатов состоит в том, что разработанный подход может быть положен в основу интеллектуальных систем мониторинга и прогноза. Например, национальные гидрометеорологические службы могут использовать подобные модели для ежедневной оценки вероятности наводнений или засух, получая при этом не только цифры прогноза, но и обоснование: какие сочетания показателей привели к выводу о высоком риске. Это позволяет принять превентивные меры (например, обеспечить готовность аварийных служб) более обоснованно. Кроме того, предложенная модель может быть расширена за счет включения данных дистанционного зондирования Земли (спутниковые снимки) — в этом случае сверточные сети будут обрабатывать еще и пространственную информацию, а DENFIS — интегрировать ее с локальными измерениями.

В будущем планируется дальнейшее совершенствование гибридной модели. Одно из направлений — внедрение механизмов объяснения на основе внимания трансформера совместно с нечеткими правилами, чтобы получать еще более наглядные визуализации причинно-следственных связей (например, выделение на временном графике интервалов, наиболее повлиявших на решение, вкупе с лингвистическими правилами). Другое направление — адаптивное обучение модели на лету (online learning) с постепенным обновлением правил DENFIS по мере поступления новых данных о событиях, что позволит системе не деградировать при изменении климатических условий во времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. World Meteorological Organization (WMO). Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019). WMO-No. 1267, 2021. — 14 p.
2. Reichstein M., et al. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science // Nature. 2019. 566(7743). P. 195–204. DOI: 10.1038/s41586-019-0912-1
3. Gao S., Wang Y. Explainable deep learning powered building risk assessment model for proactive hurricane response // Risk Analysis. 2023. 43(6). P. 1222–1234. DOI: 10.1111/risa.13990
4. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition // Proc. IEEE Conf. Computer Vision, and Pattern Recognition (CVPR). 2016. P. 770–778. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90
5. Vaswani A., et al. Attention is All You Need // Proc. 31st Int. Conf. Neural Information Processing Systems (NIPS). 2017. P. 5998–6008.
6. Kasabov N.K., Song Q. DENFIS: Dynamic Evolving Neural-Fuzzy Inference System and Its Application for Time-Series Prediction // IEEE Trans. Fuzzy Systems. 2002. 10(2). P. 144–154.
7. Jang J.-S.R. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system // IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics. 1993. 23(3). P. 665–685.
8. Yeganejou M., et al. DCNFIS: Deep Convolutional Neuro-Fuzzy Inference System // arXiv preprint arXiv:2308.06378, 2024
9. Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A., Stone C.J. Classification and Regression Trees. Belmont, CA: Wadsworth, 1984. 368 p.
10. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. 8(3). P. 338–353.

© Кошелев Никита Дмитриевич (koshlenksy@gmail.com); Новиков Кирилл Сергеевич (kirill1novikov1@gmail.com);

Юрков Николай Кондратьевич (yurkov_nk@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВЫЯВЛЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВЫХ КУБИТ КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА НА СТАДИИ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ КВАНТОВОГО РЕГИСТРА

IDENTIFICATION OF UNSTABLE QUBITS OF A QUANTUM COMPUTER AT THE INITIALIZATION STAGE OF A QUANTUM REGISTER

**A. Kryuchkov
Ju. Pastuhova**

Summary. A mathematical model is proposed for conducting a preliminary assessment of the quality of a quantum computer qubit in accordance with the technical information on the quantum register provided by the vendor of quantum hardware. The predicative model allows the user to determine the most stable quantum states for their subsequent inclusion in the designed quantum circuit before the direct launch of the quantum device. The simulation result can be verified after initializing the register at idle mode, providing an additional opportunity to identify the uncharacteristic behavior of quantum states, the instability of which can serve as a legitimate reason for their exclusion from the programmable quantum circuit, where the precision of the initialization of the quantum register is a necessary condition.

Keywords: quantum computer, qubit, quantum register, quantum programming, quantum register initialization, mathematical modeling, statistical analysis, multiple linear regression, QISs Benchmark.

Крючков Андрей Андреевич

аспирант, старший преподаватель, ФГБОУ ВО
«МИРЭА — Российский технологический университет»
kryuchkov_a@mirea.ru

Пастухова Юлия Ивановна

кандидат физико-математических наук, доцент,
старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «МИРЭА —
Российский технологический университет»

Аннотация. Предложена математическая модель, предназначенная для проведения предварительной оценки качества кубит квантового компьютера в соответствии с технической информацией о квантовом регистре, предоставляемой вендором квантового оборудования. Предикативная модель позволяет пользователю определить наиболее устойчивые квантовые состояния с целью их последующего включения в проектируемую квантовую схему до непосредственного запуска квантового устройства. Результат моделирования может быть верифицирован после инициализации регистра на «холостом ходу», обеспечивая дополнительную возможность выявления нехарактерного поведения квантовых состояний, неустойчивость которых может послужить закономерным поводом для их исключения из программируемой квантовой схемы, где точность инициализации квантового регистра является необходимым условием.

Ключевые слова: квантовый компьютер, кубит, квантовый регистр, квантовое программирование, инициализация квантового регистра, математическое моделирование, статистический анализ, множественная линейная регрессия, QISs Benchmark.

Введение

В рамках создания бенчмарка квантовых вычислительных устройств (КВУ) для специалистов в области обеспечения информационной безопасности авторы столкнулись с ситуацией, при которой получаемые результаты имели расхождения с ожидаемыми значениями. В ходе исследований установлено — причиной неочевидному поведению некоторых кубит квантовой схемы является, предположительно, побочный аппаратный шум, оказывающий значительное влияние на некоторые квантовые состояния, что негативно сказывается на итогах выполнения квантовой программы [1].

В целях выявления неустойчивых кубит, использование которых может привести к получению некорректного результата работы квантовой схемы, предложена математическая модель, которая в совокупности с ак-

туальной информацией о технических характеристиках (ТХ) облачного КВУ на стадии инициализации формирует предварительную оценку качества квантовых состояний. По результатам запуска квантового компьютера в режиме «idle» (на «холостом ходу») верификация модели явным образом указывает на кубиты, значения которых существенным образом выходят за пределы ожидаемого диапазона, что предлагает пользователю веские основания в пользу исключения из квантовой схемы кубита с непредсказуемым поведением.

Технические характеристики квантовых процессоров

На сегодняшний день на рынке квантовых вычислений представлено ограниченное количество компаний и исследовательских групп, занимающихся разработкой квантовых компьютеров. Одним из лидеров отрасли яв-

ляется корпорация IBM, предоставляющая возможность работы с облачными КВУ компании [11]. На текущий момент облачная платформа IBM Quantum Platform располагает двумя бесплатными квантовыми компьютерами, с суммарным ограничением работы — 10 минут в месяц.

Основные характеристики квантовых процессоров IBM с примерами числовых значений для нескольких кубит облачного КВУ «ibm_brisbane» представлены в табл. 1. Значения представленных характеристик следуют из результатов исследования квантовых процессоров различными методами оценки свойств квантовых компьютеров [2–6]. Влияние приведенных параметров сказывается на работе квантового компьютера на протяжении полного цикла работы произвольной квантовой программы, затрагивая три стадии обработки квантовой схемы: инициализация квантового регистра, выполнение программы, измерение квантовых состояний с сохранением результата в классическом двоичном представлении. Установив, какие из указанных параметров и в какой степени вносят свои коррективы на исход выполнения квантовой схемы, можно с некоторыми допущениями предположить точность ожидаемого результата.

Несмотря на подробное сопровождение квантовых компьютеров сведениями с характеристиками процессора, некоторые кубиты демонстрируют аномальное «поведение», противоречащее предоставляемым техническим параметрам облачного КВУ.

Таким образом, авторам видится актуальной задача нахождения «дешевого» (с точки зрения затрачиваемых вычислительных ресурсов) и эффективного способа исследования потенциальных возможностей квантового компьютера, с целью своевременного выявления неустойчивых кубит и их оперативного исключения из проектируемой квантовой схемы.

Программный комплекс QISs Benchmark

В рамках разработки программного комплекса QISs Benchmark (Quantum Information Security [7]) первоначальная задумка авторов заключалась в систематизации нескольких практически значимых задач из области информационной безопасности, выполнение которых на облачных КВУ демонстрировало бы вычислительный потенциал рассматриваемой системы совокупно с качеством производимых расчетов.

Промежуточные итоги показали — для улучшения точности получаемых результатов следует внимательно подходить к отбору квантовых состояний регистра КВУ. Решение поставленной задачи может быть достигнуто путем построения универсальных математических моделей, всесторонне учитывающих характеристики квантового компьютера и предсказывающих возможный результат работы квантовой схемы в зависимости от поставленной задачи.

Таблица 1.

Влияние параметров сверхпроводящих КВУ на этап выполнения квантовой схемы.
Значения параметров для «ibm_brisbane» на 12.04.2025

Этап выполнения квантовой схемы	Параметр КВУ											
	T1, μ s	T2, μ s	Frequency, (GHz)	Anharmonicity (GHz)	Readout length, ns	Readout error	meas0 prep1	meas1 prep0	(ID) error	(Pauli-X) error	(sx) error	ECR error
(1)							■	■				
(2)	■	■	■	■					■	■	■	■
(3)					■	■						
Кубит												
0	237.3	56.1	4.72	−0.3	1300	0.02	0.02	0.02	0.000207			—
1	330.8	400.1	4.81	−0.3	1300	0.02	0.01	0.03	0.000106			—
...
126	178.4	124.5	4.91	-0.3	1300	7e-3	7e-3	7e-3	0.0001489			—
где (1) — Инициализация квантовых состояний; (2) — выполнение квантовой схемы; (3) — измерение квантового регистра.												

В целях формирования одной из таких прогностических моделей, направленной на выявление неустойчивых кубит на стадии инициализации квантовой схемы, в актуальную версию приложения QISs_v.0.3.10 был внедрен дополнительный функционал (рис. 1).

После успешного установления соединения с облачным КВУ по уникальному пользовательскому API-токену, на вкладке «INIT-IDLE» исследователь может выбрать конкретное устройство и провести анализ квантового процессора на предмет корректности и стабильности инициализации регистра кубит в различных состояниях.

Область 1 является обязательной — с помощью слайдера (или вручную отмечая чек-боксы) пользователь выбирает кубиты, которые будут приведены в активное состояние. Если другие области (2 и 3) не выбраны — выполняется инициализация и измерение задействованных кубит в режиме «idle» (на холостом ходу).

Область 2, Область 3 — применение к отмеченным кубитам вентилей Паули «I» (строгая инициализация в '0') и «X» (инвертирование кубита) соответственно. Выбранные состояния могут не совпадать с активными кубитами в режиме «idle», но не должны выходить за пределы его диапазона.

Технические поля вкладки «INIT-IDLE»: Область 4, выбор доступного облачного КВУ, Область 5, установка параметров для запуска квантовой схемы (степень оптимизации, количество запусков, параметр «уровень значимости» (не будет рассмотрен), применение изоляционных барьеров), Область 6, проверка статуса «проекта», отмена запуска схемы, скачивание прошлых результатов с удаленного сервера платформы.

Результаты работы программы отображаются в текстовом окне приложения, а также дублируются в каталог проекта «QISs», расположенный в папке «Документы» пользовательского устройства.

Моделирование зависимости устойчивости кубит от технических характеристик облачного КВУ на стадии инициализации квантового регистра

В целях обеспечения воспроизводимости процесса моделирования внимание исследователей обращается на следующие установочные данные:

- Квантовые процессоры имеют вероятностную природу вычислений, в связи с чем результат исполнения идентичных квантовых схем может варьироваться в пределах некоторого диапазона.
- Прямое сравнение квантовых компьютеров не всегда корректно. По этой причине модели для каждого конкретного КВУ могут иметь различные коэффициенты, в то время как в рамках исследу-

емого процессора модель сохраняет свои свойства.

- Количество запусков квантовой схемы — $2 \cdot 10^4$ повторений. Этого значения достаточно для генерации информативного результата за приемлемое время.
- Обучающая выборка сгенерирована путем активации каждого кубита по отдельности в режиме «idle». Исходя из предположения, что работа соседних кубит может оказывать негативное воздействие на рядом стоящие квантовые состояния, первый и наиболее затратный по времени шаг — исследование одиночных кубит.

Планирование эксперимента по определению устойчивости квантовых состояний к возникновению побочного шума КВУ выполнено в несколько последовательных этапов:

1. Изолированная инициализация каждого кубита по отдельности.
2. Исследование TX КВУ на предмет отбора существенных предикторов.
3. Построение классической модели множественной линейной регрессии, определение степени влияния изменения формулы модели на ее свойства.
4. Полная (одновременная) инициализация квантового регистра.
5. Апробация модели. Выявление неустойчивых квантовых состояний.

Эксперименты проводились на двух квантовых компьютерах, «ibm_brisbane» и «ibm_kyvi», в режиме «idle». По завершении первого этапа исследования авторы получили массив данных, содержащий информацию о TX процессора на момент запуска квантовых схем вместе с полученными результатами «холостой» инициализации квантовых состояний. Учитывая, что количество запусков программы составляло $2 \cdot 10^4$ повторений, на выходе после измерения квантовых состояний ожидалось получить $2 \cdot 10^4$ классических нулей (в двоичном представлении).

В табл. 2 представлены результаты работы некоторых кубит исследуемых КВУ. Столбец «One» — количество «побочных» единиц в строке из $2 \cdot 10^4$ значений. Каждый кубит запускался по отдельности. Время работы квантовой схемы на одиночный кубит в режиме «idle» составило 6 секунд, таким образом, на одно устройство временной интервал генерации полного массива данных по всему регистру составил ~962 секунды (12,7 минут).

В представленной таблице авторы указали только значимые факторы в контексте решения поставленной задачи, однако, изначально отбор параметров выполнялся из совокупности всех TX, публикуемых вендором

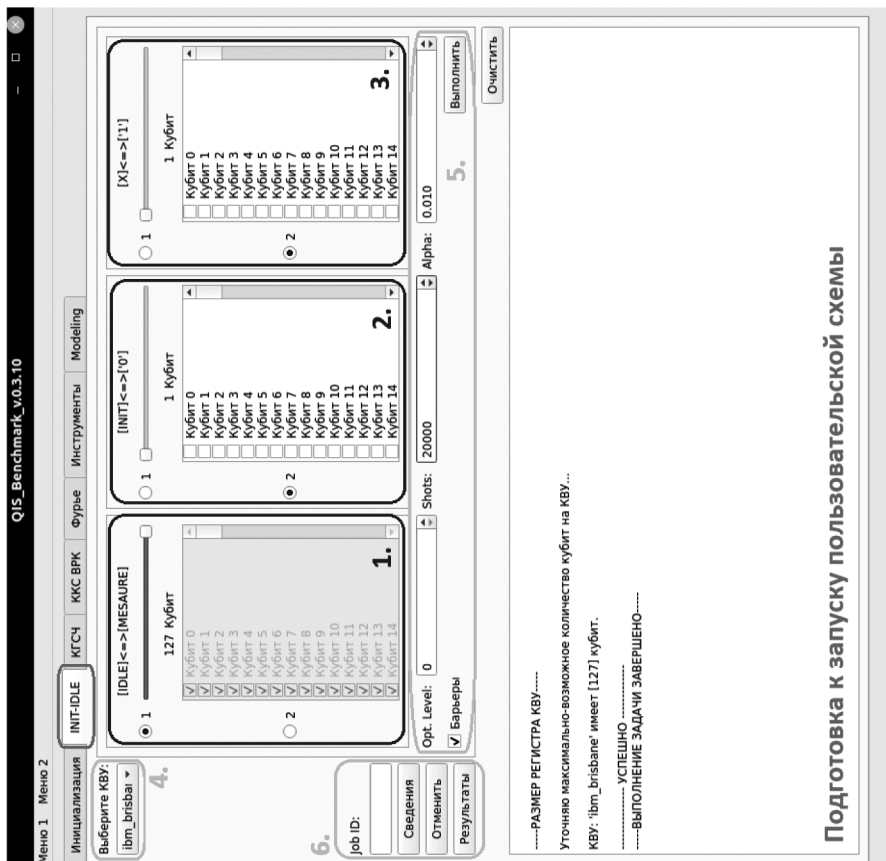
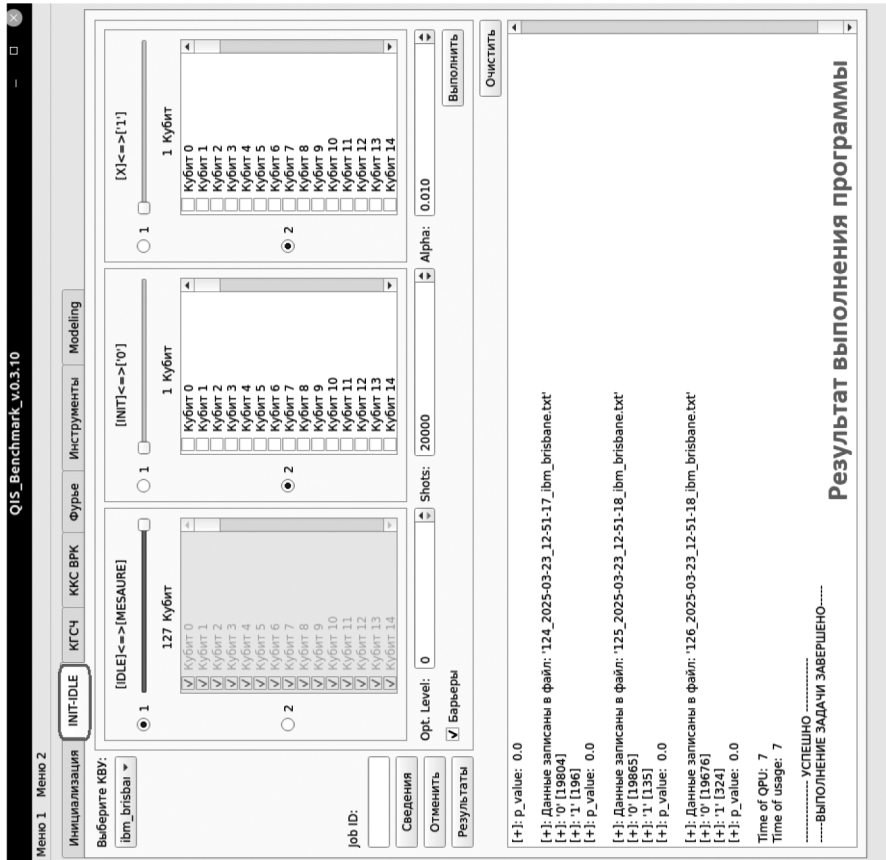


Рис. 1. Функционал QIss v.0.3.10 по исследованию этапа инициализации облачных КВУ

Таблица 2.

Результаты выполнения «холостой» инициализации кубит

«ibm_brisbane» на 06.03.2025				
Кубит	T1, мкс	Readout error	Meas1 prep0	One
0	237.363640207058	0.033203125	0.0380859375	999
1	158.45256790461264	0.02490234375	0.03369140625	265
2	227.8750927230388	0.014892578125	0.01318359375	525
3	366.2675928480455	0.023681640625	0.0380859375	221
4	172.24369977361226	0.015625	0.0185546875	248
...				
11	205.7224190331731	0.15966796875	0.16748046875	430
24	230.8487331982512	0.12548828125	0.23681640625	384
28	225.45173929366408	0.043212890625	0.0751953125	147
...				
126	258.1125314741671	0.00927734375	0.0126953125	109
«ibm_kyvi» на 05.03.2025				
0	232.31926033986932	0.005126953125	0.00390625	77
1	521.0552804202151	0.015869140625	0.0205078125	253
2	272.73794752613907	0.01171875	0.013671875	177
3	249.63594857402217	0.00634765625	0.0078125	56
4	541.8192633031138	0.084716796875	0.099609375	1607
...				
126	313.37769070206343	0.024658203125	0.03125	442

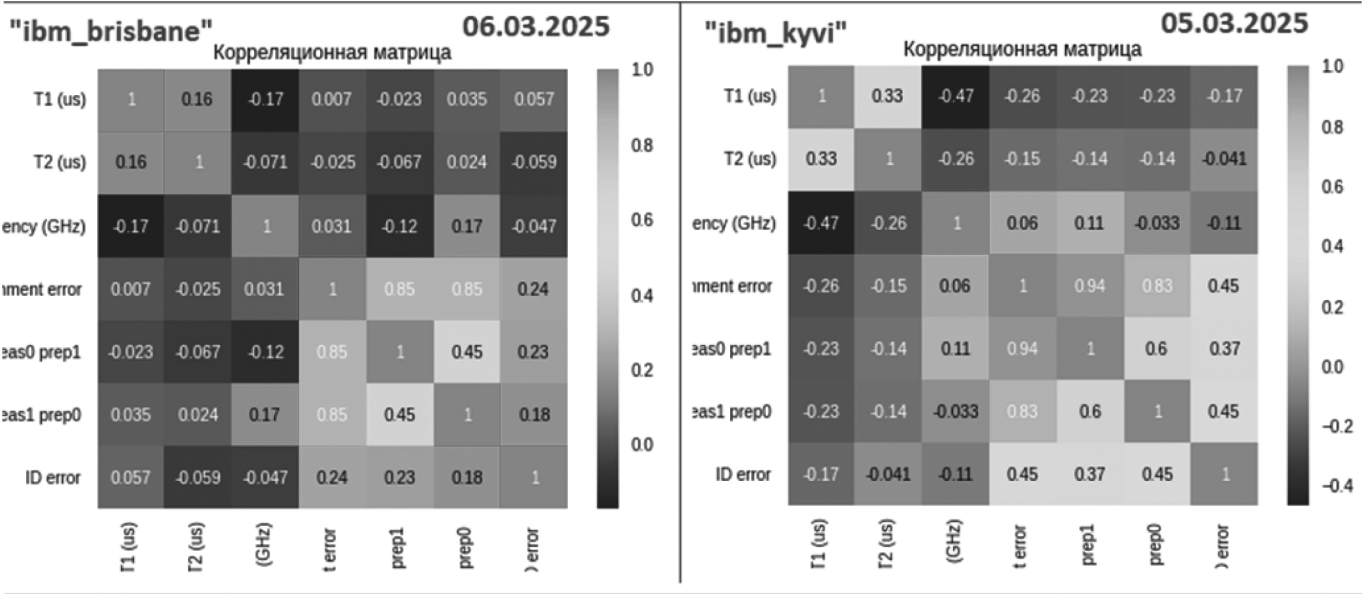


Рис. 2. Корреляционная матрица TX облачных КВУ

квантового оборудования. Корреляционные матрицы технических характеристик рассматриваемых КВУ представлены на рис. 2 (данные для 127 кубит на актуальные даты).

Важным аргументом в пользу формирования вектора значимых параметров выступает их смысловая интерпретация в контексте решаемой задачи.

«ECR-error» не рассматривается в связи с неиспользованием операции запутывания квантовых состояний. Ошибки «ID», «Pauli-X» и «SX» не актуальны по причине отсутствия применения соответствующих вентилей. Значение «Readout length» идентично для всех кубит, в связи с чем является избыточным параметром. «T2» отвечает за качество операции преобразования Уолша-Адамара. Параметр «Meas0 prep1» является противоположным поставленной задаче.

Несмотря на логические допущения касательно отбора предикторов, некоторые потенциальные факторы были проанализированы с помощью нахождения коэффициента инфляции дисперсии, вычисляемого по формуле:

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2},$$

где R_j^2 — коэффициент детерминации переменной X_j на остальные факторы модели [8].

Предиктор считается значимым для модели в том случае, если он не превосходит значение '10'. В табл. 3 представлены рассчитанные коэффициенты в разных комбинациях.

При анализе отобранных предикторов с корреляционной матрицей стоит отметить — между факторами «Readout error» и «Meas1 prep0» прослеживается определенная зависимость. Однако учитывая характер и степень влияния данных параметров на результат вы-

полнения квантовой схемы было решено сохранить оба предиктора.

Построение модели множественной линейной регрессии выполняется на полученном наборе данных для каждого облачного КВУ. Условные обозначения модели представлены в табл. 4.

Таблица 4.

Условные обозначения модели

Переменная	\hat{Y}	X1	X2	X3
Значение	One	T1	Readout error	Meas1 prep0

В результате моделирования были получены следующие коэффициенты:

«ibm_brisbane», Модель b1:

$$\hat{Y} = 0.271 \cdot X_1 + 8019,044 \cdot X_2 - 90,598 \cdot X_3 + 26,057. \quad (1.1)$$

$R^2 = 0.3149$, $RSE = 108\%$.

«ibm_kyvi», Модель k1:

$$\hat{Y} = -0,556 \cdot X_1 + 2051,165 \cdot X_2 + 16887,614 \cdot X_3 + 124,751. \quad (1.2)$$

$R^2 = 0.9303$, $RSE = 60\%$.

$$\text{где: } R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}, \quad RSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p - 1}}.$$

В качестве предварительных выводов справедливо предположение — выбранные факторы действительно могут быть использованы в целях предсказания появления побочных значений в ходе инициализации квантовой схемы. Однако коэффициент детерминации

Таблица 3.

Вычисление коэффициента инфляции дисперсии

	«ibm_brisbane»				«ibm_kyvi»			
	VIF	VIF	VIF	VIF	VIF	VIF	VIF	VIF
T1	10.3955	10.0998	1.7645	1.7645	12.5683	3.3425	1.1535	1.1535
T2	4.41197	10.9441	—	—	3.1782	3.1481	—	—
Frequency	12.7478	—	—	—	12.2696	—	—	—
Readout error	inf	inf	inf	6.8673	inf	inf	inf	3.8587
Meas0 prep1	inf	inf	inf	—	inf	inf	inf	—
Meas1 prep0	inf	inf	inf	6.2867	inf	inf	inf	3.9552

и погрешность модели **b1** (1.1) оказались неудовлетворительными. Таким образом, видится целесообразным нахождение способа улучшения качества сформированных моделей.

В ходе многочисленных серий экспериментов параметр X_1 , отвечающий за время когерентности кубита, был приведен к общему виду используемых в модели предикторов.

Зная время выполнения квантовой схемы ($6 \cdot 10^6$ мкс) и количество запусков программы ($2 \cdot 10^4$), ориентировочное время работы каждой квантовой схемы составило порядка 300 мкс (в модели выбрано 350 мкс). Учитывая временной разброс параметра T_1 по каждому квантовому состоянию (от 5 мкс на '80' кубите, до 541 мкс на '4' кубите), было решено воспользоваться следующей формулой для отражения вероятности успешного сохранения кубитом квантовых свойств на протяжении всего времени работы программы:

$$p = 1 - e^{-T/T_1}, \quad (2)$$

где T_1 — актуальное значение времени когерентности кубита, T — время, затраченное квантовым компьютером на исполнение программы. Тогда **в новой модели предиктор X_1 будет заменен на выражение (2)**.

По результатам исследования была сформулирована окончательная модель, которая на языке библиотеки «statsmodels.api» будет записана следующим образом:

$$\hat{Y} = I(X_1 \cdot X_2) + I(X_1 \cdot X_3) + I(X_1 \cdot X_2 \cdot X_3) + I(X_2 \cdot X_3) - 1, \quad (3)$$

где $X_1 = (1 - e^{-350/T_1})$, I — дескриптор для операции прямого перемножения переменных, '–1' — исключение свободного члена из выражения.

Выражение (3) предполагает формальную запись:

$$\hat{Y} = \beta_1(X_1 \cdot X_2) + \beta_2(X_1 \cdot X_3) + \beta_3(X_1 \cdot X_2 \cdot X_3) + \beta_4(X_2 \cdot X_3). \quad (4)$$

Итоговая модель (4) демонстрирует улучшение показателей для каждого КВУ. Сохранение высоких значений погрешности объясняется объемом обучающей выборки, техническими возможностями отдельно взятого КВУ и непостоянством результата работы квантовой схемы, который всегда будет варьироваться в некотором диапазоне.

Проведем серию экспериментов, в ходе которых будет проинициализирован квантовый регистр КВУ, и предскажем значения по сформированным моделям. В случаях, когда модель предсказывает появление отрицательных значений, соответствующим позициям принудительно ставилось в соответствие '0'.

Обе модели демонстрируют хорошие результаты, равные исходным данным одного порядка, однако первая модель имеет тенденцию к получению отрицательных значений. Варьируемые показатели погрешности не критичны и объясняются вероятностной природой

Таблица 5.

Коэффициенты моделей b1 и k1 в сравнении с b2 и k2 соответственно

	«ibm_brisbane»				«ibm_kyvi»			
	Модель b1		Модель b2		Модель k1		Модель k2	
	$X1=T1$	$P> t $	$X1=1-\exp-T/T1$	$P> t $	$X1=T1$	$P> t $	$X1=1-\exp-T/T1$	$P> t $
	0.27	0.45	–	–	-0.55	0.05	–	–
X2	8019.04	0.0	–	–	2051.16	0.00	–	–
X3	-90.59	0.95	–	–	16887.61	0.0	–	–
X1·X2	–	–	10615.06	0.0	–	–	2268.38	0.0
X1·X3	–	–	6860.47	0.0	–	–	19478.28	0.0
X1·X2·X3	–	–	-627527.64	0.0	–	–	-121003.44	0.0
X2·X3	–	–	434936.14	0.0	–	–	106321.85	0.0
Intercept	26.05	0.77	–	–	124.75	0.18	–	–
R2	0.3149		0.6952		0.9303		0.9552	
RSE	108 %		91 %		60 %		53 %	

Таблица 6.

Прогнозирование схемы инициализации KBY «ibm_kyvi»

	05.03			12.03			16.03		
Кубит	Y	$\hat{Y}(k1)$	Y (k2)	Y	$\hat{Y}(k1)$	$\hat{Y}(k2)$	Y	$\hat{Y}(k1)$	$\hat{Y}(k2)$
q0	98	72	68	95	23	57	99	0	38
q1	89	213	228	316	238	239	289	452	397
q2	275	227	214	178	189	193	175	139	144
q3	76	130	126	78	50	111	83	0	54
q4	1927	1679	1426	1601	1305	1083	2074	1545	1279
q5	99	54	114	85	108	121	78	134	139
		
RSE:		60 %	57 %		39 %	37 %		89 %	92 %

Таблица 7.

Прогнозирование схемы инициализации KBY «ibm_brisbane»

	06.03			07.03			12.03		
Кубит	Y	$\hat{Y}(b1)$	$\hat{Y}(b2)$	Y	$\hat{Y}(b1)$	$\hat{Y}(b2)$	Y	$\hat{Y}(b1)$	$\hat{Y}(b2)$
q0	808	353	411	988	379	484	584	308	341
q1	322	265	337	364	213	263	366	306	341
q2	129	206	183	204	467	459	99	189	100
q3	853	311	359	896	355	464	1072	342	428
q4	255	196	222	251	202	225	316	229	228
q5	112	158	137	107	166	130	122	129	77
		
q11	2968	1346	236	2973	1246	375	3009	1279	343
q24	5128	1073	678	5140	1127	640	5073	1192	547
q28	1554	426	574	1485	369	491	1683	418	602
		
RSE:		126%	138%		117%	138%		116%	128%

искомого результата выполнения инициализации квантового процессора.

Результаты моделирования на KBY «ibm_brisbane» (табл. 7) указывают на наличие высокой погрешности. Более того, некоторые кубиты имеют сильные расхождения между прогнозируемым и моделируемым значениями, и как показали исследования — дело не в свойствах модели, а в качестве и стабильности некоторых квантовых состояний.

Авторы обращают внимание на кубиты №11, 24, 28 (табл. 2, табл. 7, рис. 3).

Первое предположение кратного превосходства истинных значений по отношению к предсказанным — несовершенство математической модели. Однако опытным путем установлено — активация соседних кубит по отношению к целевому вносит значительные помехи в работу квантового состояния, существенно искажая результаты его работы (например, 28 кубит искажается при активации соседнего под номером 27). Предположение было подтверждено поочередным изолированным запуском трех проблемных кубит в режиме «idle», в ходе которого на каждую дату исследования количество отклонений '1' от общего числа нулей оказалось сопостави-

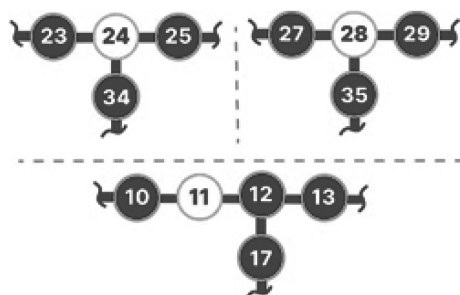


Рис. 3. Нестабильные кубиты КБУ «ibm_brisbane»

мым с результатами, представленным в табл. 2, что полностью согласуется с предсказаниями модели в табл. 7.

Если из полученных данных исключить строки с тремя неустойчивыми кубитами, то модели предсказания будут иметь погрешность: **b1** — (76 %; 73 %; 73 %), **b2** — (59 %; 88 %; 53 %). Учитывая, что даже принудительное применение вентиля Паули « σ_x » не исправляет ситуацию, можно сделать обоснованное заключение о нестабильности выявленных квантовых состояний в условиях активации всего КБУ, что является аргументированным доводом в пользу их исключения из проектируемой квантовой схемы.

С подробными результатами исследований можно ознакомиться в репозитории проекта [12].

Заключение

В рамках подведения итогов выполненного исследования авторы резюмируют:

1. Сформулированный подход позволяет пользователям на начальной стадии проектирования

квантовой схемы оценить возможное качество и точность инициализации квантовых состояний, что может быть критичным для многих квантовых алгоритмов. Функционал программного комплекса QISs_Benchmark с графическим интерфейсом призван автоматизировать процесс анализа КБУ.

2. Предложенная математическая модель является универсальной, однако для каждого КБУ необходимо сформировать свой набор данных с обучающей выборкой. Модель отличается низкими требованиями к затрачиваемым вычислительным ресурсам — для выявления неустойчивых кубит на КБУ «ibm_brisbane» полное время работы квантовой схемы составило 6 секунд. Модель является наглядной, предоставляя однозначно интерпретируемые результаты, которые могут быть в дальнейшем верифицированы.
3. Для улучшения качества и свойств предложенной модели требуется увеличение обучающей выборки. Однако, в условиях накладываемых ограничений по времени работы облачных КБУ на одного пользователя накопление данных может оказаться продолжительным по времени.
4. Полученные результаты востребованы в случаях необходимости точной инициализации квантового регистра, что зачастую требуется во многих квантовых алгоритмах, в том числе в рамках моделирования задач выработки и распределения двоичных последовательностей между пользователями в случаях, когда задействуются вычислительные возможности рассматриваемых квантовых систем [9, 10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Крючков А.А., Комогоров К.Е. Неочевидные аспекты бенчмарка квантовых вычислительных устройств на примере генерации случайных чисел // Правовая информатика. 2024. №4. С. 42–51.
2. Proctor T., Young K., D. Baczewski A., Blume-Kohout R. Benchmarking quantum computers: [Электронный ресурс]. arXiv. 2024. Режим доступа: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.08828> (дата обращения: 15.05.2025).
3. Amico M., Zhang H., Jurcevic P. et al. Defining Standard Strategies for Quantum Benchmarks: [Электронный ресурс]. IBM Publications. 2023. Режим доступа: <https://research.ibm.com/publications/defining-standard-strategies-for-quantum-benchmarks> (дата обращения: 15.05.2025).
4. Acuaviva A., Aguirre D., Pena R., Sanz M. Benchmarking Quantum Computers: Towards a Standard Performance Evaluation Approach: [Электронный ресурс]. arXiv. 2024. Режим доступа: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.10941> (дата обращения: 15.05.2025).
5. Eisert J., Hangleiter D., Walk N. et al. Quantum certification and benchmarking. *Nat Rev Phys*, 2, (2020), 382–390.
6. Darwish A., Grossi M., Vallecorsa S., Di Meglio A. A scalable, more extensible architecture for ABAQUS. // EU open Research Repository: [Электронный ресурс]. — 2023. — Режим доступа: <https://zenodo.org/records/7528880> (дата обращения 20.09.24).
7. Патент № RU2025613655 Российская Федерация, QISs_v.0.3.9: N 2025611456: заявл. 28.01.2025: опубл. 13.02.2025 / Крючков А.А. // ФИПС: [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=d8610a444bffcfa589893984d1fc4eb2> (дата обращения: 01.03.2025).
8. Rawlings J., Pantula S., Dickey D. Applied Regression Analysis: A Research Tool. — 2nd ed. — (Springer texts in statistics), 1998. 657p. ISBN 0-387-98454-2.
9. Гушанский С.М., Потапов В.С., Коваленко М.С. Разработка и исследование программного обеспечения и методов построения квантовых алгоритмов для решения задач NP класса // Вестник Адыгейского государственного университета. 2021. №2 (281). С. 56–65.
10. Баранов В.В., Ромашенко В.В., Цыгулев И.Н. Разработка обучающей системы моделирования и демонстрации криптографических протоколов квантового распределения ключа // Инженерный вестник Дона. 2023. №5.
11. Платформа облачных квантовых вычислений // IBM Quantum Platform. [Электронный ресурс]. — URL: <https://quantum.ibm.com/> (дата обращения 19.05.25).
12. Репозиторий проектов Github. Результаты экспериментов. [Электронный ресурс]. — URL: [https://github.com/cyberravenman/QISs/tree/main/Expierement/Result_%2B_exp\(-T1\)](https://github.com/cyberravenman/QISs/tree/main/Expierement/Result_%2B_exp(-T1)) (дата обращения: 19.05.25).

ОБНАРУЖЕНИЕ СЕТЕВЫХ АТАК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА СЛУЧАЙНОГО ЛЕСА В УСЛОВИЯХ НЕСБАЛАНСИРОВАННЫХ ДАННЫХ

DETECTION OF NETWORK ATTACKS USING THE RANDOM FOREST METHOD IN CONDITIONS OF UNBALANCED DATA

**O. Kulikova
A. Pinigin**

Summary. The article is devoted to the topic of detecting attacks using the random forest method in conditions of unbalanced data.

This article presents the application of the Random Forest machine learning method for detecting and classifying network attacks based on network traffic analysis.

The stages of preparing the selected CICIDS2017 dataset are described, including removing correlating features, balancing classes, and selecting the most significant features.

Special attention is paid to modifying the model by adjusting the class weights and optimizing the hyperparameters of the model, which made it possible to increase the accuracy of detecting rare types of attacks.

The results of the study showed the effectiveness of using ensemble methods in the task of classifying network attacks, the possibility of using a random forest in real intrusion detection systems (IDS).

Keywords: machine learning, random forest, attack classification, network traffic analysis, class balancing.

Куликова Ольга Витальевна

Доцент, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону

Пинигин Андрей Сергеевич

Донской Государственный Технический Университет, г. Ростов-на-Дону

AndreyIAMN1Pinigin@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена теме обнаружения атак с использованием метода случайного леса в условиях несбалансированных данных.

В данной статье представлено применение метода машинного обучения «случайный лес» (Random Forest) для обнаружения и классификации сетевых атак на основе анализа сетевого трафика.

Описаны этапы подготовки выбранного набора данных CICIDS2017, включая удаление коррелирующих признаков, балансировку классов и отбор наиболее значимых признаков.

Особое внимание уделяется модификации модели с настройкой весов классов и оптимизацией гиперпараметров модели, что позволило повысить точность распознавания редких видов атак.

Результаты исследования показали эффективность использования ансамблевых методов в задаче классификации сетевого атак, возможность применения случайного леса в реальных системах обнаружения вторжений (IDS).

Ключевые слова: машинное обучение, случайный лес, классификация атак, анализ сетевого трафика, балансировка классов.

Введение

С развитием цифровых технологий и увеличением объема передаваемой информации возрастает угроза кибератак на корпоративные и государственные информационные системы.

Одним из перспективных направлений обеспечения безопасности является использование методов машинного обучения для анализа сетевого трафика и автоматического выявления аномального поведения [1].

Особый интерес представляет применение ансамблевых алгоритмов, одним из которых является Random Forest. Ансамблевые методы демонстрируют высокую точность и устойчивость к переобучению при работе с многомерными данными [2]. Как показано в обзоре, такие подходы все чаще применяются в системах обнаружения вторжений. [6] Реализация моделей на практике часто осуществляется с помощью библиотеки scikit-learn [10].

Однако, в задачах обнаружения атак часто возникает проблема с балансом данных, которая может существенно снизить эффективность модели по редким классам атак [7].

Данная работа посвящена построению модели обнаружения атак с использованием метода случайного леса, включающая этапы препроцессинга данных, настройки весов классов и оптимизации гиперпараметров модели.

1. Набор данных

Для исследования использовался набор данных CICIDS2017 — один из наиболее популярных, открытых наборов данных, содержащий как нормальный трафик, так и вредоносный. Данные содержат метки классов атак, включая: Dos/DDos, Web Attack (SQLi, XSS, Brute Force), Botnet, PortScan, FTP/SSH Patator и другие.

На этапе объединения в единый датасет было решено исключить файл «Monday-WorkingHours.csv» содер-

жащий в себе только нормальный трафик, чтобы избежать избыточности выборки.

2. Препроцессинг данных

Перед построением модели необходимо произвести препроцессинг данных, с целью подготовить данные к процессу обучения, выявить и удалить различные выбросы, ошибки в данных, что позволяет повысить эффективность обучаемой на этих данных модели.

2.1. Общая подготовка данных

Данный этап препроцессинга данных производил их общую подготовку и решал проблему размерности датасета. Данные проверялись на наличие бесконечных и нулевых значений и удалял последние.

Так же были исключены признаки, не влияющие на классификацию:

- IP-адреса,
- Порты,
- Временная метка,
- Протоколы.

Эти параметры могут быть легко изменены злоумышленниками вследствие чего не должны влиять на обучение модели.

2.2. Балансировка классов

Классы сетевого трафика были сильно не сбалансированы: количество нормального трафика превышало

1 миллион, тогда как некоторые виды атак имели менее 5 тысяч записей.

Классы атак Web Attack — XSS, Infiltration, «Web Attack — Sql Injection и Heartbleed были исключены из набора данных в связи с слишком малым количеством примеров, что означает, что модель обучить на этих данных будет невозможно, либо она будет часто ошибаться.

Для устранения дисбаланса данных использовались следующие методы:

- RandomUnderSampler — снижение числа экземпляров больших классов до 90 тысяч примеров;
- BorderLineSMOTE — искусственное увеличение малочисленных классов до 10 тысяч примеров.

Балансировка проводилась только на тренировочной выборке, чтобы избежать утечки данных и переобучения модели.

2.3. Удаление коррелирующих признаков

Построена матрица корреляции, и признаки с коэффициентом корреляции выше 0.8 были удалены. Это позволило снизить размерность входных данных и повысить обобщающую способность модели.

3. Построение модели

3.1. Выбор метода машинного обучения

Для решения задачи классификации был выбран метод случайного леса (Random Forest), который имеет ряд преимуществ:

```
#проверяем датсет на inf и nan значения

has_inf = np.isinf(worker_df.select_dtypes(include='number').values).any()
if has_inf:
    print("В датсете есть бесконечные значения, удаляем их")
    worker_df.replace([np.inf, -np.inf], np.nan, inplace=True)
else:
    print("Датасет не имеет бесконечных значений")

has_nan = np.isnan(worker_df.select_dtypes(include='number').values).any()
if has_nan:
    print("Датасет имеет NAN значения, удаляем")
    worker_df.dropna(inplace=True)

# До преобразования было (2589427, 84)
display(worker_df.shape)
```

Python

В датсете есть бесконечные значения, удаляем их
Датасет имеет NAN значения, удаляем

(2298395, 84)

Рис. 1. Проверка на наличие бесконечных и пустых значений

```
#Определение количества строк с нормальным трафиком и содержащим атаку
normal_traffic_total = len(worker_df[worker_df["Label"] == "BENIGN"])
attack_traffic_total = len(worker_df[worker_df["Label"] != "BENIGN"])
display("Нормальный трафик: {}".format(normal_traffic_total))
display("Аномальный трафик: {}".format(attack_traffic_total))

#Вывод всех возможных значений метки Label
display(worker_df['Label'].value_counts())
```

'Нормальный трафик: 1741839'

'Аномальный трафик: 556556'

Label	
BENIGN	1741839
DoS Hulk	230124
PortScan	158804
DDoS	128025
DoS GoldenEye	10293
FTP-Patator	7935
SSH-Patator	5897
DoS slowloris	5796
DoS Slowhttptest	5499
Bot	1956
Web Attack - Brute Force	1507
Web Attack - XSS	652
Infiltration	36
Web Attack - Sql Injection	21
Heartbleed	11
Name: count, dtype: int64	

Рис. 2. Виды атак и их количество в наборе данных

```
#функция автоматической стратегии балансировки
def balancing_strategy(y_train, min_samples=1000, max_samples=100000):
    class_counts = dict(Counter(y_train))
    over_strategy = {}
    under_strategy = {}

    for cls, count in class_counts.items():
        if count < min_samples:
            over_strategy[cls] = min_samples
        elif count > max_samples:
            under_strategy[cls] = max_samples
        else:
            pass # оставляем как есть

    return over_strategy, under_strategy

over_strategy, under_strategy = balancing_strategy(y_train, min_samples=10000, max_samples=90000)

print("Стратегия Oversampling:", over_strategy)
print("Стратегия Undersampling:", under_strategy)

# пайплайн, производящий преобразование над классами
pipeline = Pipeline([
    ('over', BorderlineSMOTE(sampling_strategy=over_strategy, n_jobs=-1)),
    ('under', RandomUnderSampler(sampling_strategy=under_strategy))
])

#применяем пайплайн
x_res, y_res = pipeline.fit_resample(x_train, y_train)

print('\nПосле балансировки:', sorted(Counter(y_res).items()))

До балансировки: [(0, 1219287), (1, 1369), (2, 89617), (3, 7205), (4, 161087), (5, 3849), (6, 4057), (7, 5555), (8, 111163), (9, 4128), (10, 1055)]
Стратегия Oversampling: {7: 10000, 5: 10000, 9: 10000, 3: 10000, 6: 10000, 1: 10000, 10: 10000}
Стратегия Undersampling: {0: 90000, 8: 90000, 4: 90000}
C:\Users\MeizekiN\anaconda3\Lib\site-packages\imblearn\over_sampling\_smote\filter.py:197: FutureWarning: The parameter `n_jobs` has been deprecated in 0.
warnings.warn(

После балансировки: [(0, 90000), (1, 10000), (2, 89617), (3, 10000), (4, 90000), (5, 10000), (6, 10000), (7, 10000), (8, 90000), (9, 10000), (10, 10000)]
```

Рис. 3. Функция балансировки тренировочной выборки

```
#создаем функцию и удаляем наиболее коррелирующие признаки
def remove_correlated_features(input_df, threshold=0.9):
    #вычисляем матрицу корреляции
    corr_matrix = input_df.corr().abs()

    #верхний треугольник матрицы корреляции
    upper = corr_matrix.where(np.triu(np.ones(corr_matrix.shape), k=1).astype(bool))

    #поиск столбцов с корреляцией = выше заданного порога
    to_drop = [column for column in upper.columns if any(upper[column]>= threshold)]

    return input_df.drop(columns=to_drop), to_drop

#удаление для тренировочной выборки

x_train_clean_corr_df, dropped_corr_features=remove_correlated_features(x_train, threshold=0.9)
print(f'Удалено признаков: {len(dropped_corr_features)}')
print(f'Удаленные признаки: {dropped_corr_features}')

# удаляем точно такие же признаки из тестового набора
# для согласованности данных и снижения риска утечки
x_test_clean_corr_df = x_test.drop(columns=dropped_corr_features, errors='ignore')
```

Python

Удалено признаков: 32

Удаленные признаки: ['Total_Backward_Packets', 'Total_Length_of_Bwd_Packets', 'Fwd_Packet_Length_Std', 'Bwd_P

Рис. 4. Удаление коррелирующих признаков из выборок

```
from collections import Counter
counts = Counter(y_train)
total = sum(counts.values())
class_weights = {cls: round((total / count), 3) for cls, count in counts.items()}

print(f"Веса для классов: {class_weights}")
```

Веса для классов: {0: 4.774, 1: 42.962, 2: 4.794, 3: 42.962, 4: 4.774, 5: 42.962, 6: 42.962, 7: 42.962,

Рис. 5. Расчет весов для каждого класса

- Работать с категориальными признаками и числовыми признаками,
- Хорошая устойчивость к переобучению,
- Позволяет оценить важность признаков.

3.2. Настройка весов классов

Для повышения чувствительности модели к редким видам атак была проведена настройка весов классов с учетом их относительной частоты.

3.3. Оптимизация гиперпараметров

Поиск оптимальных параметров производился в два этапа:

1. RandomizeSearchCV — Поиск приблизительного диапазона.
2. GridSearchCV — Финальная точная настройка.

Настройке подвергались следующие параметры:

- n_estimators,
- max_features,
- min_samples_leaf.
- max_depth.
- min_samples_split.
- bootstrap.

3.4. Отбор важных признаков

Для уменьшения размерности и повышения интерпретируемости модели использовался метод

SelectFromModel (SFM) на основе обученного дерева решений. Метод SelectFromModel позволил повысить обобщающую способность модели, что подтверждается успешным применением аналогичных подходов в реальных задачах детектирования атак [9]

Результаты

Финальная модель показала улучшение качества по сравнению с базовой версией, что согласуется с результатами исследований, в которых были продемонстрированы преимущества использования ансамблевых методов в задачах классификации сетевого трафика [4][5]:

Таблица 1.

метрика	Первая модель	Финальная модель
Accuracy	95 %	97 %
F1-score (в среднем)	0.82	0.91

Особенно улучшилось качество по редким классам, но для использования в реальной системе обнаружения вторжений, все же стоит увеличить количество примеров редких классов.

Заключение

В работе продемонстрирована эффективность применения ансамблевого метода Random Forest для обнаружения сетевых атак. Предложенный подход, включающий препроцессинг, балансировку классов и подбор гиперпараметров, позволил достичь высокой точности модели.

Результаты могут быть использованы при разработке современных систем обнаружения вторжений, основанных на методах машинного обучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шелухин О.И., Сакалема Д.Ж., Филинова А.С. Обнаружение вторжений в компьютерной сети // Горячая линия-телеком. — 2013. — № 4. — С. 45–52.
2. Скарфон К., Мелл П. Руководство по системам обнаружения и предотвращения вторжений (IDPS). Специальная публикация NIST 800–94, 2007.
3. Коммстад Т. и др. Машинное обучение для обнаружения вторжений в компьютерные сети: Обзор // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2020. — Том 22, № 2. — С. 1296–1322.
4. Красильников Н.Н. Анализ сетевого трафика с использованием методов машинного обучения // Информационные технологии и защита информации. — 2021. — № 2. — С. 112–120.
5. Васильев А.А. Обнаружение атак в сетях на основе случайного леса // Вестник новых информационных технологий. — 2022. — № 3. — С. 78–85.
6. Ганем Р. и др. Обнаружение сетевых вторжений с использованием методов машинного обучения: всесторонний обзор // Компьютеры и безопасность. — 2021. — Том 107. — DOI: 10.1016/j.cose.2021.102311
7. Романов М.А., Коваленко А.С. Методы борьбы с дисбалансом классов в задачах анализа киберугроз // Защита информации. Инновационные технологии. — 2020. — № 3. — С. 45–50.
8. Педрегоса Ф. и др. Scikit-learn: Машинное обучение на Python // Journal of Machine Learning Research. — 2011. — Том 12. — С. 2825–2830.
9. Ван дер Уолт, К.М., Элофф, Дж. Х.П., Лабушань, В.А. Методы машинного обучения для обнаружения сетевых аномалий // Материалы конференции по информационной безопасности Южной Африки 2011 года. — 2011. — С. 1–7.
10. Ласков П., Шрндич Н. Практическая оценка детекторов вредоносных программ на основе машинного обучения // Препринт arXiv arXiv: 1801.08318, 2018.

© Куликова Ольга Витальевна; Пинигин Андрей Сергеевич (AndreyIAMN1Pinigin@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СИСТЕМА БЕЗОПАСНОГО ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ФАЙЛОВ НА ОСНОВЕ РИДА—СОЛОМОНА

SECURE FILE STORAGE AND TRANSMISSION SYSTEM BASED ON REED-SOLOMON

**G. Lomonosov
A. Brysin
Yu. Kirilina
V. Lavrushin**

Summary. Within this work, the possibility of implementing a secure file storage system in an enterprise's local network without using centralized storage is considered to minimize the risks associated with centralized storage of files and other sensitive information. This article presents the development of an innovative system for secure storage and transmission of files based on the use of Reed—Solomon codes. The relevance of the study is determined by the increasing demands for protecting digital information, the growing volume of transmitted data, and the need to ensure its integrity when transmitting through unreliable communication channels. The main goal of the work is to create a reliable mechanism for error detection and correction that can maintain high efficiency even under significant interference. The research methodology is based on the theoretical principles of coding and Reed-Solomon algorithms, which are widely used to eliminate errors during the transmission of digital data. The article describes in detail the stages of system development, including an analysis of existing solutions, the selection of optimal coding parameters, the design of the algorithm for processing and forming redundant data, as well as the modeling of failure scenarios. The experimental part of the research was conducted using simulated test sets representing various levels of file damage, which allowed for the assessment of the error-correcting capability of the proposed method. Experimental results demonstrated that the implementation of Reed—Solomon algorithms significantly increases the reliability of the information storage and transmission system. The proposed solution guarantees the recovery of lost segments of data even at a high error level, showing performance comparable to modern counterparts in the field of information protection. Additional analysis confirmed the system's resilience to various types of impacts, making it promising for use in mission-critical applications. The discussion of the obtained results allows one to assert that the proposed system represents an effective means of ensuring the security of digital data. In conclusion, directions for further research are considered, including the expansion of functionality, integration with cryptographic methods, and adaptation to different industry requirements. The combination of theoretical foundations and practical solutions presented in the article opens new prospects for the development of comprehensive information protection systems in the context of modern cyber threats.

Keywords: centralization, decentralization, recovery, redundancy, secret sharing, encryption, broadcasting, unidirectional data transfer.

Ломоносов Георгий Алексеевич

Лаборант,

Российский технологический университет МИРЭА
personal@glomonosov.ru

Брысин Андрей Николаевич

Кандидат технических наук, доцент,

Российский технологический университет МИРЭА
brysin@rambler.ru

Кириллина Юлия Владимировна

Кандидат экономических наук, доцент,

Российский технологический университет МИРЭА
kirilina@mirea.ru

Лаврушин Вадим Максимович

Российский технологический университет МИРЭА
76187@bk.ru

Аннотация. В рамках работы рассматривается возможность реализации системы безопасного хранения файлов в локальной сети предприятия без использования централизованного хранилища для минимизации рисков, связанных с централизованным хранением файлов и другой чувствительной информации. В данной статье представлена разработка инновационной системы безопасного хранения и передачи файлов, основанной на применении кодов Рида—Соломона. Актуальность исследования определяется возрастающими требованиями к защите цифровой информации, увеличением объема передаваемых данных и необходимостью обеспечения их целостности при передаче через ненадежные каналы связи. Основной целью работы является создание надежного механизма обнаружения и коррекции ошибок, способного сохранять высокую эффективность даже в условиях значительных помех. Методология исследования базируется на теоретических принципах кодирования и алгоритмах Рида—Соломона, широко применяемых для устранения ошибок при передаче цифровых данных. В статье подробно описаны этапы разработки системы, включающие анализ существующих решений, подбор оптимальных параметров кодирования, проектирование алгоритма обработки и формирования избыточных данных, а также моделирование сценариев отказов. Экспериментальная часть исследования проводилась с использованием симулированных тестовых наборов, представляющих различные уровни повреждений файлов, что позволило оценить корректирующую способность предлагаемого метода. Результаты экспериментов показали, что внедрение алгоритмов Рида—Соломона существенно повышает надежность системы хранения и передачи информации. Предложенное решение гарантирует восстановление утраченных участков данных даже при значительном уровне ошибок, демонстрируя показатели, сопоставимые с современными аналогами в области защиты информации. Дополнительный анализ подтвердил устойчивость системы к различным видам воздействий, что делает ее перспективной для применения в критически важных приложениях. Обсуждение полученных результатов позволяет утверждать, что предложенная система представляет собой эффективное средство обеспечения безопасности цифровых данных. В заключение рассматриваются направления дальнейших исследований, включая расширение функционала, интеграцию с криптографическими методами и адаптацию к различным требованиям отрасли. Сочетание теоретических основ и практических решений, изложенных в статье, открывает новые перспективы для разработки комплексных систем защиты информации в условиях современной киберугрозы.

Ключевые слова: централизация, децентрализация, восстановление, избыточность, разделение секрета, шифрование, широковещание, однонаправленная передача данных.

На текущий момент обеспечение информационной безопасности на различных предприятиях в подавляющем большинстве случаев выстроено по централизованной модели. Централизация безусловно имеет много позитивных аспектов. В первую очередь она позволяет гораздо удобнее и эффективнее осуществлять мониторинг и администрирование. Если говорить о файловых хранилищах, то с точки зрения как пользователя, так и администратора, они являются крайне удобным и эффективным средством. Пользователи знают, в каком конкретном месте они могут получить нужные им данные, а администраторам гораздо проще обеспечивать работоспособность всего лишь одного сервера вместо множества таковых и так же удобно осуществлять разграничение доступа к разным данным разным сотрудникам и отделам. Децентрализация передачи данных особенно актуальна при обмене информации от менее защищенного сегмента сети к более защищенному в режимах однонаправленной многопоточной передачи данных.

Однако вместе с очевидными удобствами такой уклон в сторону централизации ведет и к негативным аспектам. Основным недостатком централизованного хранения чувствительных данных стоит назвать наличие единой точки отказа в широком смысле слова. Кроме того, что наличие единого узла хранения данных при выходе его из строя отрежет всем сотрудникам доступ к большому числу данных на неопределенный срок, под единой точкой отказа понимается также возможность одновременной компрометации огромного объема чувствительных данных компании. Причем случиться такая компрометация может по совершенно разным причинам, а ее источником может быть как внешний, так и внутренний нарушитель. Именно возникающие вследствие централизованного хранения файлов риски и ведут к постановке различных задач по внедрению децентрализованных инструментов.

В качестве входных данных использовались сведения о кодах Рида-Соломона.

Коды Рида-Соломона — это линейные не двоичные систематические циклические коды, используемые для обнаружения и исправления ошибок в цифровых данных.

Основные параметры кодов Рида-Соломона [1, с. 684; 2, с. 745]:

- Длина кодового слова (n): общее количество символов в кодовом слове;
- Число информационных символов (k): количество символов, содержащих исходную информацию;
- Число проверочных символов ($n - k$): количество символов, добавленных для обнаружения и исправления ошибок.

Коды Рида-Соломона определяются над конечным полем $GF(q)$, где $q = 2^r$, а r — положительное целое число. Каждый символ кодового слова представляет собой элемент этого поля и может быть представлен r -битовой последовательностью.

Порождающий многочлен кода Рида-Соломона строится на основе примитивного элемента α конечного поля $GF(q)$ и имеет вид:

$$g(x) = (x - \alpha^{l_0}) * (x - \alpha^{l_0+1}) * \dots * (x - \alpha^{l_0+d-2}),$$

где l_0 — некоторое целое число, часто принимаемое равным 1, а $d = n - k + 1$ — минимальное кодовое расстояние. Степень порождающего многочлена ($n - k$).

Процесс кодирования заключается в умножении информационного многочлена $m(x)$ степени не более $(k - 1)$ на порождающий многочлен.

$$c(x) = m(x) * g(x),$$

где $c(x)$ — полученный кодовый многочлен степени $(n - 1)$ [2, с. 745].

Задача была разделена на две части — отправка файла на хранение и получение файла из хранилища.

Перед отправкой файл разбивается на блоки одинакового размера. В случае, если последний блок данных будет меньше остальных, его конец будет заполнен нулями. Размер блока вычисляется по формулам [1, с. 684]

1. $bs = bs_{min} * ((fs - bs_{min})^{coef})$
2. $bs = \max(bs_{min}, (bs, bs_{max}))$
3. $bs = \left(\frac{(bs + a - 1)}{a} \right) * a,$

где bs — размер одного блока, bs_{min} — минимальный размер блока, bs_{max} — максимальный размер блока, $coef$ — коэффициент роста, fs — размер файла, a — значение выравнивания, выставляется в соответствии с шириной машинного слова на конкретной системе.

В результате разбиения файла формировались два массива данных — первый хранил содержимое файла, разбитое на блоки, второй — блоки восстановления, из которых в случае отсутствия блоков данных можно восстанавливать информационную часть данных.

После разбиения файла на блоки происходит процедура шифрования, применяемая к каждому блоку данных и восстановления. Шифрование осуществлялось блочным шифром «Кузнечик» [3]. Перед началом процесса шифрования формируется ключ шифрования,

который в свою очередь формируется из токена пользователя операционной системы. При первом запуске программы ею генерируются три объекта — токен пользователя, гамма и соль. Эти объекты в дальнейшем используются для шифрования и дешифрования данных, которые отправляет и принимает автоматизированная система. Все три объекта (рисунок 1), закреплены за конкретным пользователем операционной системы. По окончании процесса формирования этих сущностей, если программа запускается впервые, или их чтения формируется ключ шифрования используемого блочно-го шифра, после чего при помощи этого ключа шифруются все блоки данных и блоки восстановления



Рис. 1. Блок-схема процесса шифрования блоков данных

После того, как все блоки данных были зашифрованы, выполняется процедура получения хэш-суммы для

каждого блока. Получение хэш-сумм выполняется при помощи функции хэширования «Стрибог» [3]. По результатам вычисления хэш-функций формируется два массива — с хэш-суммами блоков данных и блоков восстановления соответственно.

Завершающий этап отправки файла на хранение заключается в отправке данных случайно выбранному компьютеру в локальной сети, на котором запущен сервер приема данных. Сначала формируется сообщение с запросом на хранение блока данных, которое содержит хэш-сумму отправляемого блока. Это сообщение отправляется по широковещательному адресу сети на порт 62092/UDP. После отправки клиент ждет подтверждения в течение 5 секунд. При поступлении такого сообщения на сервер серверная часть программы проверяет возможность сохранить блок данных в своем хранилище. Если проверка дает положительный результат, то сервер формирует подтверждение отправки с той же хэш-суммой, после чего отправляет обратно клиенту. Клиент, получая первое подтверждение, формирует сообщение, содержащее блок и его хэш-сумму, после чего отправляет тому серверу, от которого пришло подтверждение (рисунок 2). Сервер в свою очередь принимает это сообщение и сохраняет блок в своем хранилище (рисунок 3). Эта процедура повторяется для каждого блока данных.

По завершении отправки исходный файл перезаписывается структурой, хранящей все хэш-суммы блоков и размер одного блока, сериализованной по стандарту JSON и затем закодированной при помощи алгоритма Base64. На этом этапе завершается отправка файла на хранение.

Получение файла из хранилища начинается с чтения содержимого файла с последующими декодировани-

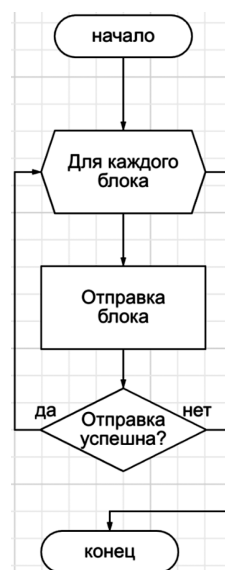


Рис. 2. Блок-схема процесса отправки данных клиентом

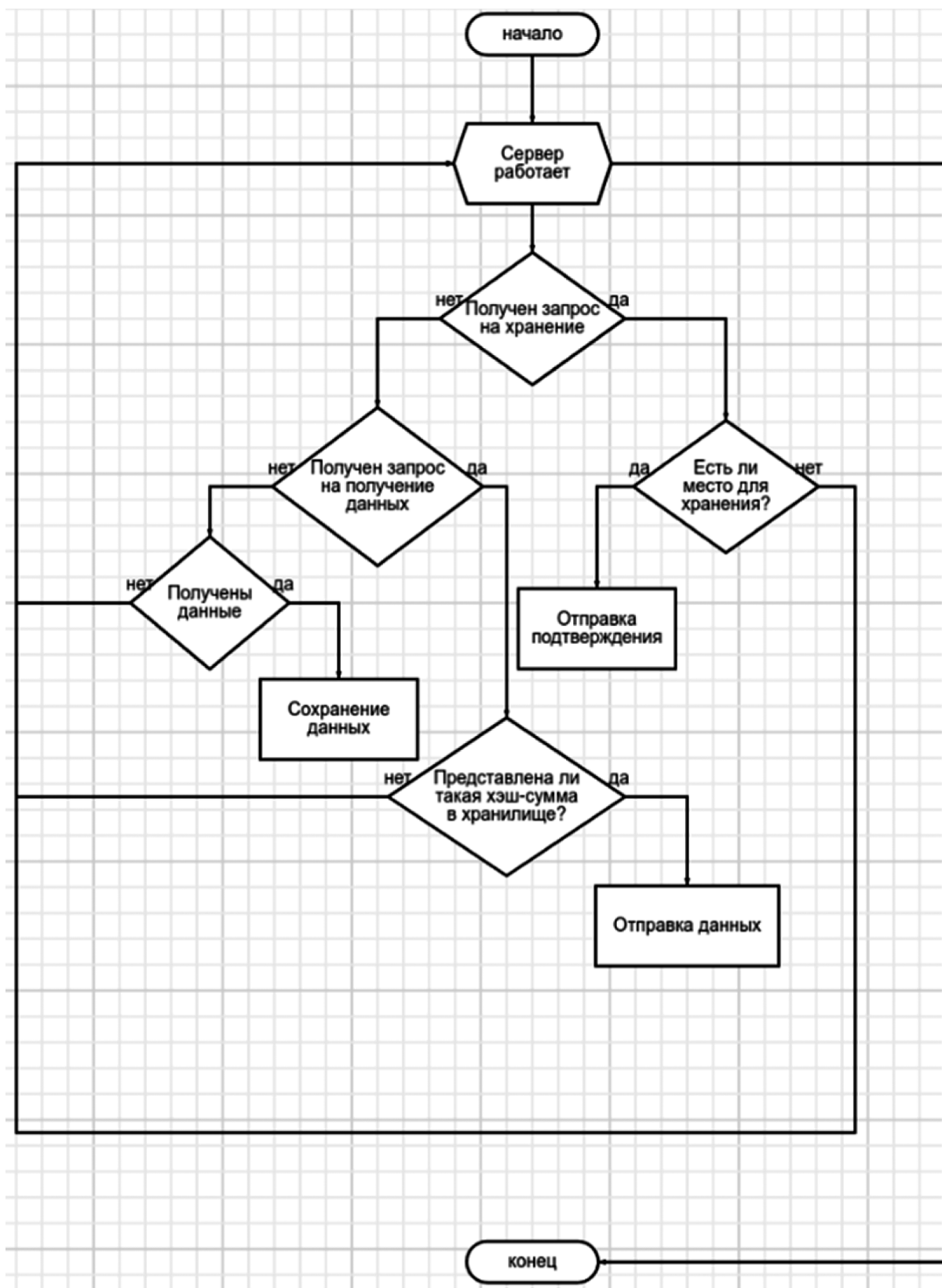


Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы сервера



Рис. 4. Блок-схема процесса получения блоков клиентом при помощи алгоритма Base64 и десериализацией по стандарту JSON.

После получения структуры, хранящей хэш-суммы блоков и размер одного блока начинается процесс получения данных из широковещательного домена. Для этого для каждой хэш-суммы формируется запрос на получение данных, содержащий хэш-сумму запрашиваемого блока. Этот запрос отправляется на широковеща-



Рис. 5. Блок-схема процесса дешифрования блоков

тельный адрес сети на порт 62092/UDP [5, с. 955]. Клиент ожидает ответа в течение 5 секунд (рисунок 4). Сервер, получив такой запрос, ищет в своем хранилище данные с указанной хэш-суммой, и в случае успеха формирует сообщение (рисунок 3), содержащее хэш-сумму блока и сам блок, после чего отправляет его клиенту. Важно отметить, что в случае, если клиенту не удалось по каким-либо причинам получить блок данных, то программа не завершается. Если по результатам получения блоков данных какие-то блоки не были получены, то будет предпринята попытка получить соответствующие блоки восстановления с уведомлением пользователя об этом по алгоритму, описанному выше.

После того, как все блоки были расшифрованы, начинается процесс восстановления файла из блоков по схеме Рида — Соломона. В ходе восстановления программа воссоздает информационную часть файла, после чего проверяет, были ли дописаны нули в конец потока данных. Если были, то они удаляются. В результате этого преобразования будет получено изначальное содержимое файла.

Завершающим этапом является запись в исходный файл полученных данных. На этом процесс получения файла из хранилища завершен.

Таблица 1.

Результаты тестирования разбиения данных при передаче

Сценарий тестирования	Результаты отправки файла	Результаты получения файла	Изменения исходного файла	Примечания
Идеальная передача	Все блоки данных и восстановления успешно отправлены обоим серверам в случайном порядке	Файл был успешно получен	Не обнаружены	Блоки восстановления остались на хранении
В процессе передачи файла не был отправлен блок данных	Программа уведомила пользователя о невозможности отправки всех данных в сеть, после чего завершилась	Файл не был получен	Не обнаружены	Часть блоков может быть отправлена на хранение
В процессе передачи файла не был отправлен блок восстановления	Программа уведомила пользователя о невозможности отправки всех данных в сеть, после чего завершилась	Файл не был получен	Не обнаружены	Часть блоков может быть отправлена на хранение
Сценарий тестирования	Результаты отправки файла	Результаты получения файла	Изменения исходного файла	Примечания
В процессе получения файла не был получен блок данных	Все блоки данных и восстановления успешно отправлены обоим серверам в случайном порядке	Файл был успешно получен	Не обнаружены	Часть блоков восстановления осталась на хранении
В процессе получения файла не был блок данных и соответствующий ему блок восстановления	Все блоки данных и восстановления успешно отправлены обоим серверам в случайном порядке	Файл не был получен	Полностью перезаписан	Часть блоков данных и восстановления осталась на хранении

После того, как все блоки были получены, начинается процесс дешифрования. Процесс получения ключа аналогичен тому, который был описан для процесса шифрования (рисунок 5).

Результаты тестирования

Тестирование проводилось на сжатом при помощи алгоритма gzip tar-архиве размером 929 Кб. Тестовый стенд представлял собой локальную сеть из трех виртуальных машин:

1. Debian 12 будет выступать в роли клиента и отправлять, и запрашивать файл;
2. Ubuntu 24.04 выступает в роли сервера;
3. Fedora 41 выступает в роли сервера.

В процессе тестирования проверялись: Работоспособность в идеальных условиях, когда никакие данные не были потеряны ни при передаче на хранение, ни при получении из хранилища.

- Работоспособность в условиях, когда при передаче файла был потерян один информационный блок;
- Работоспособность в условиях, когда при получении файла не был получен блок данных;
- Работоспособность в условиях, когда при получении файла не были получены блок данных и соответствующий ему блок восстановления.

По окончании тестирования была составлена таблица результатов, представленная в Таблице 1.

Под идеальной передачей в рамках тестирования понимается ситуация, при которой все сформированные блоки были успешно отправлены, а при восстановлении файла были успешно получены все блоки данных.

Таким образом, автоматизированная система требует отправки всех сформированных блоков для корректного завершения работы и отправки файла на хранение. В процессе восстановления файла программа допускает возможность потери вплоть до всех сформированных блоков данных и восстановление всех данных из блоков восстановления, однако если вместе с блоком данных будет утерян соответствующий ему блок восстановления, то файл будет невозможно восстановить. Разработанное решение позволяет избежать возможности перехвата чувствительных данных во время их передачи, а использование встроенных систем аутентификации используемых операционных систем позволит избежать необходимости обеспечения сохранности хранимого пароля, делегировав это механизмам безопасности ОС.

Реализация шифрования и использование криптографической хэш-функции позволяет свести к минимуму возможность возникновения коллизий и поиска прообраза данных, а также сразу обнаружить нарушение целостности хранимых данных. Предлагаемое решение может быть использовано при реализации однонаправленных шлюзов с разбиением потоков данных. Применение таких решений необходимо при реализации однонаправленной передачи пакетов объемом более 200 мегабайт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рацеев С.М. Элементы высшей алгебры и теории кодирования: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2023. 684 с.
2. Ф.Дж. Мак-Вильямс, Н.Дж. А. Слоэн, Ф.Дж. Мак-Вильямс, Н.Дж.А. Слоэн Теория кодов, исправляющих ошибки / Ф.Дж. Мак-Вильямс, Н.Дж. А. Слоэн Ф.Дж. Мак-Вильямс, Н.Дж. А. Слоэн. — Москва: Связь, 1979. — 745 с.
3. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 34.11–2018 «Информационная технология. Криптографическая защита информации. Функция хэширования» (утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 августа 2012 г. N 216-ст): дата введения: 2019-06-01. — URL: <https://protect.gost.ru/v.aspx?control=8&baseC=-1&page=0&month=-1&year=-1&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=224241>(дата обращения: 24.02.2025). — Текст: электронный.
4. Межгосударственный стандарт ГОСТ Р 34.12–2018 «Информационная технология. Криптографическая защита информации. Блочные шифры» (утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 4 декабря 2018 г. N 1061-ст): дата введения: 2019-07-01. — URL: <https://protect.gost.ru/v.aspx?control=8&baseC=-1&page=0&month=-1&year=-1&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=224244>(дата обращения: 24.02.2025). — Текст: электронный
5. Таненбаум, Уэзеролл. Э.Д. Компьютерные сети / Э.Д. Таненбаум, Уэзеролл. — Санкт-Петербург: Питер, 2020. — 955 с.
6. Блэнди Дж. Программирование на языке Rust / пер. с англ. А.А. Слинкина. / Дж. Блэнди, Дж. Орендорф. — М.: ДМК Пресс, 2018. — 550 с.: ил. с. — ISBN 978-5-97060-236-2.

© Ломоносов Георгий Алексеевич (personal@glomonosov.ru); Брысин Андрей Николаевич (brysin@rambler.ru);
Кириллина Юлия Владимировна (kirillina@mirea.ru); Лаврушин Вадим Максимович (76187@bk.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ ОТЧЕТОВ О СТУДЕНЧЕСКОЙ УСПЕВАЕМОСТИ НА ОСНОВЕ ДООБУЧЕННОЙ ЯЗЫКОВОЙ МОДЕЛИ GPT-2

AUTOMATIC GENERATION OF ANALYTICAL REPORTS ON STUDENT PERFORMANCE BASED ON THE ADVANCED GPT-2 LANGUAGE MODEL

**D. Maksimov
Ph. Chervakov**

Summary. The article presents a method for the automated generation of analytical reports on student academic performance using a fine-tuned GPT-2 language model. The relevance of this study is driven by the growing volumes of educational data and the need for timely analysis of student performance to provide prompt feedback. The authors compiled a specialized dataset containing students' academic indicators and instructors' textual reports. Using this corpus, GPT-2 (774M parameters) was fine-tuned leveraging the HuggingFace Transformers library and PyTorch. As a result, the model effectively generated human-like analytical texts. Evaluation included automatic metrics (BLEU, ROUGE) and expert assessments by instructors. Generated reports demonstrated high accuracy (4.8/5), clarity (4.6/5), and usefulness of recommendations (4.7/5). Automation significantly reduced the workload of educators and enhanced personalized feedback accessibility for students. Discussed limitations include the necessity for high-quality training data and the model's limited context window. Future research directions encompass employing more advanced language models and integrating generated reports into educational practices to evaluate their impact on learning outcomes.

Keywords: analytical reports, student performance, automatic text generation, natural language processing, GPT-2, neural networks, machine learning, model fine-tuning, educational data, feedback.

Максимов Денис Романович
Национальный Исследовательский
Ядерный Университет «МИФИ»
maksimov.official@mail.ru
Черваков Филипп Сергеевич
Национальный Исследовательский
Ядерный Университет «МИФИ»
pschervakov@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается метод автоматического формирования аналитических отчетов об успеваемости студентов с использованием дообученной языковой модели GPT-2. Актуальность работы обусловлена значительным увеличением объемов образовательных данных и необходимостью оперативного анализа успеваемости студентов для предоставления своевременной обратной связи. Авторами был подготовлен специализированный корпус данных, содержащий показатели академической успеваемости и текстовые отчеты преподавателей. На его основе осуществлено дообучение модели GPT-2 (774 млн параметров) с использованием библиотеки HuggingFace Transformers и PyTorch. В результате модель приобрела способность генерировать тексты, близкие по качеству к составленным человеком. Оценка производилась при помощи автоматических метрик (BLEU, ROUGE) и экспертного оценивания преподавателями. Сгенерированные отчеты показали высокую точность (4.8/5), ясность (4.6/5) и полезность рекомендаций (4.7/5). Автоматизированное создание отчетов существенно сокращает трудозатраты преподавателей и повышает доступность персонализированной обратной связи для студентов. Среди обсуждаемых ограничений — необходимость качественного корпуса данных и ограниченный контекст модели. Перспективы дальнейших исследований включают применение более мощных моделей и интеграцию с педагогическими практиками для оценки влияния на образовательные результаты.

Ключевые слова: аналитические отчеты, студенческая успеваемость, автоматическая генерация текстов, обработка естественного языка, GPT-2, нейронные сети, машинное обучение, дообучение моделей, образовательные данные, обратная связь.

Введение

В современном образовании стало нормой накопление больших объемов данных об успеваемости студентов — результаты тестов, посещаемость, активность в онлайн-курсах и др. [3]. Для их анализа сформировалась область Educational Data Mining (EDM) [3]. Однако вручную обрабатывать такие данные сложно: по мере роста числа студентов и объема информации подготовка отчетов требует всё больше времени и ресурсов [8, с. 220]. Особенно это актуально в боль-

ших классах, где анализ результатов становится трудоёмким [3].

При этом своевременная персонализированная обратная связь критически важна для обучения. Регулярные отчеты помогают студентам понимать свои слабые стороны, а преподавателям — корректировать учебный процесс. Однако подготовка таких отчетов вручную затруднена. Здесь могут помочь современные языковые модели. Модели вроде GPT, основанные на архитектуре Transformer, способны генерировать связные тексты, имитируя человеческий язык [4].

В данной работе представлен подход к автоматическому формированию отчётов об успеваемости с использованием дообученной модели GPT-2. Она была выбрана как открытая трансформер-модель, подходящая для обучения на специализированных корпусах. Модель дообучена на данных об успеваемости студентов для генерации понятных отчётов. Цель — сократить время преподавателей на подготовку аналитики и обеспечить быструю обратную связь. Рассматриваются проблемы интеграции данных [1] и оценки качества отчётов с использованием метрик и экспертных оценок.

Таким образом, работа актуальна ввиду потребности в автоматизированных инструментах анализа образовательных данных и генерации отчётов, способных повысить эффективность и качество обучения.

Смежные работы

Традиционные подходы к генерации образовательных отчетов.

Автоматическая генерация текстов на основе образовательных данных — задача, объединяющая аналитику обучения и Natural Language Generation (NLG). Ранние решения, такие как система LARC из Университета Эдинбурга, генерировали отчеты по данным Moodle, сравнивая активность студента с нормами и группой [9, с. 300]. LARC также анализировала эмоциональный тон форумов, но в целом использовала шаблонный подход. Другие системы (Civitas, Knewton) предоставляли сводки и визуализации, но не формировали персонализированные тексты [9, с. 250].

Позже начали применяться методы машинного обучения. Так, Kobashi и Mine (2021) предложили Seq2Seq-модель с вниманием для генерации предложений отчетов на основе ключевых слов, заданных преподавателем [5, с. 713]. Этот подход превзошёл IR-методы по метрикам BLEU и ROUGE, но ограничен: генерирует только отдельные фразы и требует ручного ввода ключевых слов.

Современные языковые модели в EDM

С развитием LLM, особенно GPT-серии, стало возможным генерировать цельные тексты на сложных данных [2]. GPT-2, обученная на миллионах веб-страниц, продемонстрировала высокую связность текста, а её преемники (GPT-3/3.5/4) усилили этот эффект [2]. В образовании LLM применяются для генерации обратной связи, оценки ответов и резюмирования. Например, Zhou et al. (2024) использовали ChatGPT и систему тегов для генерации персонализированных отзывов по данным об обучении [3]. Учителя подтвердили качество таких отчетов, хотя подход требует сложной аннотации и работы с API.

Другие модели, вроде BERT, не генерируют тексты, но применяются в анализе: классификация отзывов, оценка эссе, анализ высказываний студентов. Например, специализированный BERT показал лучшую классификацию речевых актов, чем ChatGPT, но уступал в интерпретируемости [4]. Это подчеркивает: LLM обеспечивают гибкость и выразительность, в то время как специализированные модели — точность.

Сильные и слабые стороны решений

Шаблонные системы обеспечивают контролируемость, но страдают однообразием. Модели Seq2Seq дают более естественные формулировки, но ограничены в контексте и требуют ручного ввода. Большие модели GPT обладают богатым языком, могут учитывать широкий контекст и адаптироваться к стилю, но нуждаются в ресурсах и контроле. Без дообучения возможны галлюцинации и ошибки. Поэтому перспективным подходом является fine-tuning GPT на корпусе успеваемости студентов. Далее в работе рассматривается реализация такого подхода на базе GPT-2 и сравнение с другими методами.

Материалы и методы

Архитектура GPT-2

GPT-2 — это генеративная трансформер-модель, состоящая из $N \times N$ декодерных блоков с маскированным многоголовым вниманием и MLP-слоем, а также residual-соединениями, нормализацией и dropout [6, с. 125; 7, с. 320]. На вход подаются токены с позиционными эмбедингами; маскирование внимания делает генерацию авто-регрессивной. Вариант GPT-2 XL включает 48 блоков и ~1.5 млрд параметров, доступны и облегченные версии (117M–774M), размещенные в открытом доступе (например, HuggingFace) [4, 6, с. 276]. Для нашей задачи использована версия с ~774M параметров, дообученная на корпусе учебных данных, чтобы адаптировать её к стилю и содержанию образовательных отчетов.

Каждый блок включает слой многоголового маскированного самовнимания (обозначен красным) и позиционное сложение с входом, а также полносвязный слой (синий) для обработки выходов внимания. Нормализация (зелёный) и dropout применяются на входе и выходе каждого слоя. Справа показана схема расчёта внимания: входные представления разделяются между несколькими головами внимания, внутри каждой вычисляются Query, Key и Value векторы, по которым через матричные операции (показаны как matmul и softmax) определяются веса внимания к разным позициям последовательности [10].

Корпус данных

Для fine-tuning был подготовлен корпус из ~5,000 пар «учебные данные — текст отчета». Исходные дан-

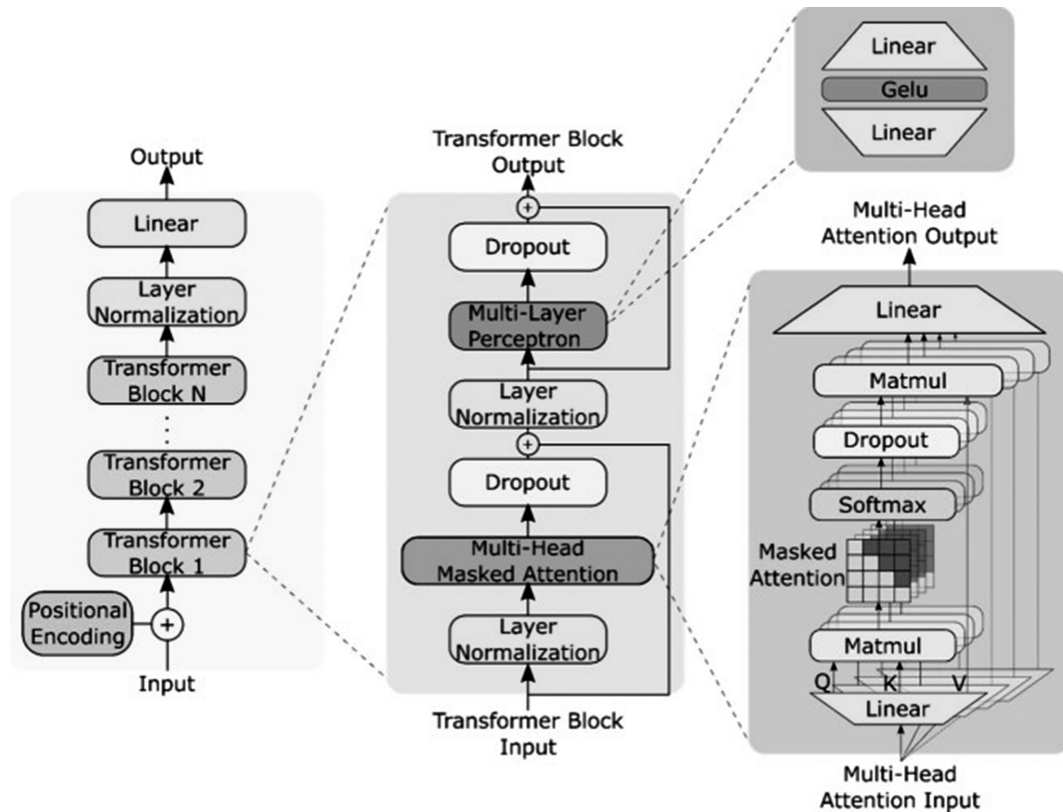


Рис. 1: Архитектура модели GPT 2, состоящая из последовательности декодерных блоков трансформера

ные обезличены и включают оценки, посещаемость, активность, а также комментарии преподавателей. Из них формировались обучающие примеры в виде структурированного ввода и целевого отчета, например:

Ввод: «Студент: А; Курс: Математика; Балл: 82...»

Вывод: «Студент А демонстрирует уверенные знания...»

Данные нормализованы, переведены в текстовый формат, обезличены.

Процесс дообучения

Модель обучалась в среде PyTorch с использованием Transformers, на GPU NVIDIA Tesla (24 ГБ). Применён AdamW с шагом $5 \cdot 10^{-5}$ и стратегией linear decay. Обучение длилось 3 эпохи (остановлено после 2 из-за plateau по val loss), заняло ~5 часов. Ввод: описание данных + маркер «Отчет»; генерация продолжения до токена.

Техническая реализация

Код реализован на Python (PyTorch 1.13, Transformers 4.x, datasets, Accelerate), обработка данных — через pandas. Все эксперименты выполнялись на Linux-сервере. Репозиторий с кодом и примерами будет опубликован для воспроизводимости [7, с. 110].

Итог:

- 1) выбрана и описана архитектура GPT-2,
- 2) подготовлен корпус данных,
- 3) выполнен fine-tuning,
- 4) подготовлена инфраструктура для оценки качества, что рассматривается далее.

Результаты и обсуждение

После дообучения модель GPT-2 способна на основе описания данных студента автоматически генерировать связный текст отчета. Ниже приведены примеры реальных и сгенерированных отчетов, иллюстрирующие работу модели до и после ее применения.

Пример 1. Входные данные (фрагмент): «Студент В, Курс: Физика, Итоговый балл: 67/100 (оценка С); Тест 1: 80 %; Тест 2: 60 %; Лабы выполнены: 5 из 8; Посещаемость: 70 %.»

- Без модели (шаблонный отчет): «Студент В имеет удовлетворительную успеваемость по курсу физики. Итоговая оценка — С. Результаты первых контрольных работ хорошие, вторых — ниже. Посещаемость оставляет желать лучшего. Требуется подтянуть знания.»
- Сгенерировано GPT-2: «Студент В демонстрирует средние результаты по физике. Итоговый балл составляет 67 из 100, что соответствует оценке С.

При этом успеваемость была неравномерной: первый тест сдан довольно успешно (80 %), тогда как во втором тесте результат снизился до 60 %. Лабораторные работы выполнены частично (5 из 8), что сказалось на общем балле. Посещаемость также невысокая (70 %). Рекомендуется восполнить пробелы по темам, вызвавшим трудности во втором тесте, и завершить оставшиеся лабораторные работы для улучшения понимания материала.»

В приведенном примере видно, что шаблонный (условно «до модели») отчет получился довольно общим и кратким. В то же время отчет, сгенерированный моделью GPT-2, более детально отражает данные: указаны конкретные проценты тестов, упомянут прогресс по лабораторным, даны рекомендации, контекстуально привязанные к выявленным проблемам (низкий результат второго теста). Язык генерированного отчета близок к академическому стилю преподавателя: соблюдается нейтральный тон, имеются связующие фразы («при этом», «что сказалось на...»). Модель явно переняла из обучающего корпуса шаблоны построения отзывов, например: упоминание позитивных аспектов (успех в первом тесте), затем указание недостатков (снижение результата, невыполненные задания) и заключение с советом.

Пример 2. Входные данные: «Студент Г, Курс: История, Итоговый балл: 92/100; Контрольные: 95 %, 88 %. Выполнил все 3 эссе; Посещаемость: 100 %; Активность: 15 сообщений; Средний результат по группе: 85.»

- Отчет GPT-2: «Студент Г показывает отличные результаты по курсу истории. Итоговый балл — 92 из 100, что выше среднего по группе (85). Студент стабильно учится: контрольные работы выполнены очень хорошо (95 % и 88 %). Все три обязательных эссе сданы в срок и получили высокие оценки. Посещаемость примерная (100 %), активность на семинарах и в форуме высокая (15 содержательных сообщений за курс). Студент проявляет глубокий интерес к предмету и активно участвует в обсуждениях. Рекомендуется продолжать в том же духе и при возможности углублять знания через дополнительные материалы — это поможет сохранить высокий уровень и в дальнейшем.»

Здесь отчет полностью сформирован моделью на основе данных. Мы видим, что модель не только перечисляет показатели, но и интерпретирует их: сравнивает итоговый балл со средним по группе, отмечает стабильность (высокие результаты по всем видам работ), хвалит инициативность студента. Таким образом, GPT-2 может производить целостный анализ, а не просто перечисление цифр. Это достигается за счет примеров в обучаю-

щем корпусе, где такие сравнения и выводы присутствовали (например, преподаватели часто указывают, выше или ниже среднего результат студента, выделяют активность и т.п.).

Для объективной оценки качества сгенерированных моделью отчетов мы использовали несколько подходов: автоматические метрики совпадения с эталонным и экспертную оценку. Каждый сгенерированный моделью отчет сравнивался с референтным (целевым) отчетом из тестового набора данных — то есть с тем текстом, который действительно был в обучающих данных для данного студента (или составлен человеком). Были вычислены метрики, широко применяемые в задачах резюмирования и NLG: BLEU (BiLingual Evaluation Understudy) и ROUGE (Recall-Oriented Understudy for Gisting Evaluation) [9, с. 450]. BLEU измеряет сходство генерированного и эталонного текста по перекрытию n-грамм, а ROUGE-N — по перекрытию подстрок длины N. Кроме того, считался ROUGE-L (Longest Common Subsequence) — длина наибольшей общей подпоследовательности, отражающая покрытие смысла. На рис. 2 представлено сравнительное качество отчетов, генерированных моделью GPT-2, по сравнению с более простым шаблонным подходом.

Видно, что модель GPT-2 существенно превосходит шаблон по всем метрикам: так, BLEU (совпадение фраз с эталоном) увеличивается с ~0.55 до ~0.72, а ROUGE-1 (совпадение униграмм) — с ~0.60 до ~0.80. Пост ROUGE-2 и ROUGE-L также указывает на более полное и точное воспроизведение моделью важных фрагментов отчета.

Дообученная GPT-2 показала высокое качество генерации — BLEU≈0.72 (против 0.5–0.6 у шаблонов) указывает на сильное лексическое сходство с эталонными отчетами. Метрики ROUGE-1 и ROUGE-2 подтвердили охват ключевых фактов. При этом совпадение формулировок не обязательно: модель часто выражает идеи иначе, но с сохранением смысла. В ручной проверке ~50 отчетов ≈80 % содержали все важные данные без искажений. Ошибки касались лишь пропусков второстепенных деталей или общей формулировки; галлюцинации не выявлены.

В экспертной оценке (5 преподавателей, по 20 отчетов) средняя точность составила 4.8/5, ясность — 4.6/5, полнота — 4.4/5, полезность — 4.7/5. Преподаватели отметили, что охотно пользовались бы моделью для черновиков. В большинстве случаев они не отличали отчеты GPT-2 от написанных вручную.

Среди ограничений — зависимость качества от обучающего корпуса: если в данных игнорируется важный показатель, модель также может его опускать. Контекстное окно GPT-2 ограничено ~1024 токенами, что может

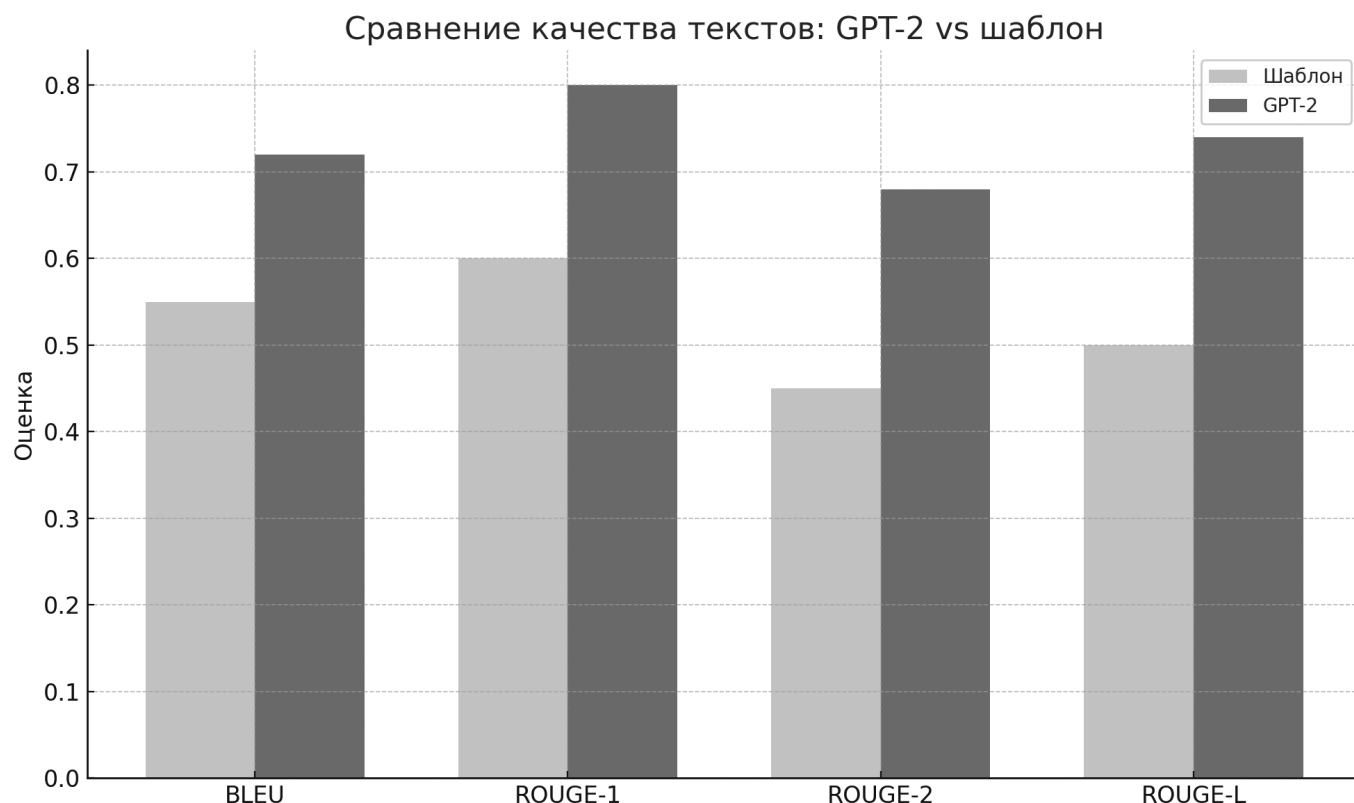


Рис. 2. Сравнение средних значений метрик качества текста для нашей дообученной модели GPT-2 (темно-серые столбцы) и для базового шаблонного метода генерации отчета (светло-серые столбцы)

быть недостаточно для длинных вводов; возможны решения — укрупнение модели (например, GPT-3) или сжатие информации. Модель не всегда улавливает причины событий (например, неявку на экзамен), если они не указаны явно. Кроме того, GPT-2 обучена на русском — для других языков потребуется перевод или дообучение многоязычных моделей. Качество генерации на русском ниже, чем на английском, из-за меньшего объема предобученных данных.

Отдельное преимущество GPT-2 — автономность и прозрачность: её можно запускать локально, не передавая данные сторонним сервисам, в отличие от API GPT-3.5/4. Хотя те показывают более разнообразный язык и логику, результаты GPT-2 уже близки к преподавательскому стилю, что делает её эффективным решением для образовательной аналитики.

Заключение

В работе продемонстрирована реализуемость и эффективность генерации аналитических отчетов об успеваемости студентов с помощью дообученной модели GPT-2. Разработан прототип, преобразующий сырые учебные данные в связный текст, близкий по стилю к отчетам преподавателей. Создан специализированный корпус, включающий показатели студентов и текстовые комментарии, на котором модель была успешно дообучена с учётом технических аспектов.

Результаты показали, что GPT-2 способна генерировать содержательные отчёты с рекомендациями и выводами. Оценки BLEU, ROUGE и экспертный анализ подтвердили близость текста к человеческому. Это существенно снижает трудозатраты преподавателей при работе с большими группами — отчёты можно редактировать вместо написания с нуля. Студенты при этом получают своевременную и персонализированную обратную связь.

Работа подтверждает, что fine-tuning позволяет адаптировать LLM к конкретной образовательной задаче. Такой подход можно масштабировать на другие предметные области (например, программирование или языковые курсы).

В дальнейшем возможно:

- протестировать более современные модели (GPT-3, Bloom и др.);
- внедрить механизмы контроля качества (например, проверку чисел и логики отчёта);
- реализовать обучение с обратной связью от преподавателей (on-the-fly fine-tuning);
- сочетать текстовую генерацию с визуальной аналитикой (диаграммы и пояснения).

Важно и педагогическое измерение: как отчёты влияют на мотивацию и успеваемость. Первичные отзывы

преподавателей позитивны, но для полной картины необходимы масштабные исследования в реальных курсах. Эта работа закладывает техническую основу и от-

крывает путь к персонализированной образовательной аналитике на базе ИИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Educational Data Mining [Электронный ресурс]. — URL: <https://educationaldatamining.org> (дата обращения: 01.06.2025).
2. HuggingFace Transformers Documentation [Электронный ресурс]. — URL: <https://huggingface.co> (дата обращения: 01.06.2025).
3. ACL Anthology [Электронный ресурс]. — URL: <https://aclanthology.org> (дата обращения: 01.06.2025).
4. Medium — HuggingFace Transformers Guide [Электронный ресурс]. — URL: <https://medium.com> (дата обращения: 01.06.2025).
5. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. — М.: Вильямс, 2021. — 1416 с.
6. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение. — М.: ДМК Пресс, 2018. — 652 с.
7. Марр Б. Аналитика данных. Как извлекать максимум из больших данных. — М.: Манн, Иванов и Фербер, 2017. — 288 с.
8. ЛеКун Я., Хинтон Дж., Бенджио Й. Глубокое обучение (статья в журнале Nature). — Nature, 2015. — Vol. 521. — P. 436–444.
9. Дьяконов А.Г. Современные методы анализа данных. — СПб.: Питер, 2019. — 592 с.
10. PMC NCBI Articles — GPT Architecture [Электронный ресурс]. — URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov> (дата обращения: 01.06.2025).

© Максимов Денис Романович (maksimov.official@mail.ru); Черваков Филипп Сергеевич (pschervakov@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АЛГОРИТМ ГЕНЕРАЦИИ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ИСПРАВЛЕНИЮ ОТКЛОНЕНИЙ В ТАБЛИЧНЫХ ДАННЫХ

ALGORITHM FOR GENERATING RECOMMENDATIONS FOR CORRECTING ANOMALIES IN TABULAR DATA

V. Mikhaylov

Summary. Modern data quality management systems are generally focused on anomaly detection, leaving the stage of interpretable and well-grounded correction up to the user. In the context of growing data volumes and limited human resources, this creates a risk of improper anomaly handling and reduced trust in analytical results. This article proposes an algorithm for generating recommendations for correcting anomalies in tabular data, combining statistical methods (mean, standard deviation, Z-score, quantile approach) with machine learning algorithms (SVM, Random Forest, Isolation Forest). The algorithm not only identifies likely anomalies but also suggests correction strategies along with explanations of the reasoning behind each decision. Based on the detection method, distribution properties, and the share of outliers, the algorithm generates recommendations such as substitution, deletion, or manual verification. Pseudocode illustrating decision logic is provided, as well as a mapping table between detection methods and correction strategies. Evaluation on synthetic data confirms the interpretability, flexibility, and practical relevance of the proposed approach. The results can be useful for developing intelligent data preprocessing systems and for integration into decision support systems.

Keywords: anomaly detection, data correction, data analytics, data quality, anomalies, tabular data.

Михайлов Владимир Денисович
Волгоградский государственный
технический университет
mikhaylov.v.d@yandex.ru

Аннотация. Современные системы управления качеством данных, как правило, сосредоточены на обнаружении аномалий, оставляя этап их интерпретируемой и обоснованной корректировки на усмотрение пользователя. В условиях роста объёмов данных и ограниченности человеческих ресурсов это создаёт риск некорректной обработки отклонений и снижения доверия к результатам анализа. В данной статье предложен алгоритм формирования рекомендаций по исправлению аномалий в табличных данных, сочетающий методы статистического анализа (среднее значение, стандартное отклонение, Z-оценка, квантильный подход) и алгоритмы машинного обучения (SVM, Random Forest, Isolation Forest). Алгоритм не только определяет вероятные отклонения, но и предлагает способы их корректировки с пояснением логики принятого решения. На основе сопоставления метода обнаружения, свойств распределения и доли выбросов формируются рекомендации: замена, удаление или ручная проверка. Представлен псевдокод, иллюстрирующий принятие решений, а также таблица соответствий между методами и стратегиями корректировки. Проведён анализ на синтетических данных, который подтвердил интерпретируемость, гибкость и практическую значимость предложенного подхода. Результаты могут быть полезны при создании интеллектуальных систем подготовки и очистки данных, а также для интеграции в системы поддержки принятия решений.

Ключевые слова: обнаружение отклонений, корректировка данных, аналитика данных, качество данных, аномалии, табличные данные.

Введение

Современные аналитические системы и системы поддержки принятия решений (СППР) всё чаще полагаются на автоматическую обработку табличных данных, получаемых из различных источников: сенсоров, CRM-систем, внешних API, электронных таблиц и корпоративных хранилищ. При этом качество исходных данных становится одним из ключевых факторов, определяющих надёжность выводов, формируемых такими системами. Снижение качества данных, а именно наличие аномальных или отклоняющихся значений, может приводить к искажению результатов анализа, ошибочным прогнозам и, как следствие, принятию неэффективных или неверных управленческих решений [1, 2].

Отклонения в данных могут возникать по целому ряду причин: технические сбои в системах сбора, ошиб-

ки при ручном вводе, несогласованность форматов, нарушение ожидаемых закономерностей [3, 4]. В то же время не каждое отклонение является ошибкой, требующей автоматического исправления. Некоторые выбросы могут отражать редкие, но значимые события, поэтому задача обнаружения и корректировки аномалий должна решаться в связке с механизмами интерпретации и сопровождения решений [5].

В настоящее время существует множество методов выявления отклонений, включая как простые статистические подходы (например, на основе среднего значения, стандартного отклонения, Z-оценки, межквартильного размаха), так и более сложные алгоритмы машинного обучения, такие как опорные векторы (Support Vector Machines, далее — SVM), случайные леса (Random Forest), алгоритм изоляции (Isolation Forest) и другие [2, 6]. Однако большинство известных решений ограничи-

ваются только стадией детектирования отклонений и не дают пользователю обоснованных рекомендаций по исправлению. Это особенно актуально в условиях, когда система ориентирована на поддержку начинающих аналитиков или используется в автоматических сценариях подготовки данных.

Предлагаемый в данной статье подход направлен на решение задачи объяснимой корректировки отклонений. Под этим понимается не только механическая подстановка исправленных значений, но и предоставление пользователю пояснений: почему то или иное значение было признано аномальным, каким методом оно было выявлено, почему была выбрана определённая стратегия исправления. Такой подход позволяет формировать доверие к результатам работы системы, а также способствует обучению пользователя и повышению качества ручного анализа.

Целью данной работы является разработка алгоритма, формирующего рекомендации по корректировке отклонений в табличных данных, основанного на логике применения различных методов обнаружения.

В качестве результата формируется универсальный, масштабируемый алгоритм, пригодный к внедрению в практические программные решения в сфере очистки и анализа данных. Он сочетает гибкость в выборе методов анализа с прозрачностью и обоснованностью предлагаемых действий по исправлению.

Обзор подходов к корректировке отклонений в табличных данных

Несмотря на большое количество публикаций, посвящённых детектированию аномалий, вопросы интерпретации и выбора стратегии исправления значений

до сих пор остаются менее формализованными. Ниже приведён краткий обзор основных подходов, применяемых на практике, с анализом их достоинств и ограничений [3, 7, 8, 9, 10].

Проведённый сравнительный анализ методов коррекции позволил выделить ключевые закономерности, лежащие в основе принятия решений. Полученные зависимости были формализованы и использованы для построения алгоритма объяснимой генерации рекомендаций, представленный ниже.

Постановка задачи и описание алгоритма генерации рекомендаций

Пусть имеется набор табличных данных:

$$D = \{x_i\}_{i=1}^n, x_i \in R^m$$

где n — количество наблюдений;
 m — количество признаков.

Для каждого элемента x_{ij} с координатами (i, j) предполагается, что применен один или несколько методов обнаружения аномалий, сформировавших бинарную матрицу отклонений:

$$A = [a_{ij}^{(k)}], a_{ij}^{(k)} \in \{0, 1\}$$

Где k — индекс метода;
 $a_{ij}^{(k)} = 1$ означает, что значение принято аномальным методом k .

Необходимо для каждого аномального значения x_{ij} сформировать рекомендацию по его корректировке, включающую:

Таблица 1.

Обзор основных подходов к корректировке аномальных значений в табличных данных

Метод	Преимущества	Недостатки	Рекомендации по применению
Удаление наблюдений	— Быстродействие	— Потеря информации — Искажение выборки при малом объёме	— При высокой достоверности выброса — При избыточности данных
Замена на среднее / медиану / моду	— Сохраняет размерность	— Среднее чувствительно к выбросам — Медиана может не отражать структуру признака	— Среднее — при симметричном распределении — Медиана — при асимметричном
Замена на значения соседей	— Учитывает контекст признаков	— Высокая вычислительная сложность — Зависимость от масштаба и нормализации	— Для связанных признаков — При умеренном количестве данных
Моделирование значений	— Учитывает сложные зависимости — Потенциально точная реконструкция значений	— Требуется обучающих данных и интерпретации	— При наличии обучающей выборки — В задачах с высокой стоимостью ошибки

- способ коррекции;
- краткое объяснение, основанное на логике сработавших методов;
- условия, при которых рекомендация является предпочтительной.

Алгоритм построен как каскадный набор логических правил с приоритетами, основанными на:

- свойствах используемых методов (одно— или многомерные, чувствительность к распределению, устойчивость к выбросам)
- характеристики набора данных (плотность распределения, симметричность, объем выборки)
- контекст аномалии (наличие повторяющихся шаблонов ошибок, локальное или глобальное отклонение)

Для каждого значения x_{ij} подсчитывается взвешенное количество методов, определивших его как аномальное:

$$s_{ij} = \sum_k w_k * a_{ij}^{(k)}$$

где w_k — вес метода (настраивается в зависимости от характеристик набора данных)

Далее на основе этого необходимо определить степень отклонения значения:

для КАЖДОЙ ячейки (i, j) в таблице данных:

```

ЕСЛИ значение (i, j) признано аномальным КАК МИНИМУМ двумя методами И
распределение признака j близко к нормальному И
доля аномалий в признаке j < 5%
ТО
    рекомендовать: ЗАМЕНА НА СРЕДНЕЕ;
    обоснование: "Нормальное распределение и незначительное количество выбросов позволяют использовать среднее значение";

ИНАЧЕ ЕСЛИ распределение признака j асимметрично И
доля аномалий ≥ 5%
ТО
    рекомендовать: ЗАМЕНА НА МЕДИАНУ;
    обоснование: "Медиана устойчива к выбросам в асимметричных распределениях";

ИНАЧЕ ЕСЛИ значение обнаружено методом Isolation Forest И
степень аномальности > 0.7 (или в верхнем квантиле)
ТО
    рекомендовать: УДАЛЕНИЕ СТРОКИ;
    обоснование: "Алгоритм изоляции выявил крайне нетипичное наблюдение по совокупности признаков";

ИНАЧЕ ЕСЛИ значение признано аномальным методом Z-оценки И
абсолютная Z-оценка > 3 И
значение явно не соответствует возможному диапазону
ТО
    рекомендовать: ЗАМЕНА НА МЕДИАНУ;
    обоснование: "Значение выходит за 3 средних отклонения и выглядит нереалистично";

ИНАЧЕ ЕСЛИ значение признано аномальным только методом IQR И
объем выборки < 1000 (средняя или небольшая выборка)
ТО
    рекомендовать: ВИНСОРИЗАЦИЯ;
    обоснование: "Метод устойчив при малом объеме данных, где другие оценки ненадежны";

ИНАЧЕ ЕСЛИ значение выявлено SVM-методом И
другие методы не выявили аномалии
ТО
    рекомендовать: РУЧНАЯ ПРОВЕРКА;
    обоснование: "Выброс выявлен, но не подтвержден статистическими методами";

ИНАЧЕ
    рекомендовать: РУЧНАЯ ПРОВЕРКА;
    обоснование: "Недостаточная уверенность для автоматической корректировки";

```

Рис. 1. Реализация алгоритма на примере псевдокода

1. Низкая степень: значение признано аномальным одним статистическим методом.
2. Средняя степень: значение признано аномальным несколькими статистическими методами.
3. Высокая степень: значение признано аномальным как статистическими, так ML-методами.

Затем для каждого признака m рассчитываются:

- Коэффициент асимметрии и эксцесса;
- Объем выборки;
- Наличие других отклонений в строке i .

Эти метрики необходимы для выбора стратегии коррекции на основе данных Таблицы 1.

Реализуемый алгоритм на примере псевдокода представлен в соответствии с рисунком 1.

Оценка эффективности разработанного алгоритма

Для оценки эффективности разработанного алгоритма объяснимой корректировки отклонений был проведен ряд экспериментов на табличных наборах данных на синтетических наборах данных. В качестве метрик эффективности использовались следующие показатели:

- Точность обнаружения — доля корректно выявленных аномалий среди всех меток;
- Адекватность рекомендаций — доля случаев, в которых предложенное системой действие совпадало с экспертной оценкой;
- Время обработки — среднее время, затрачиваемое на анализ и формирование рекомендаций по корректировке.

Результаты показали, что алгоритм демонстрирует устойчивую работу на гетерогенных выборках, сохраняя высокую точность обнаружения (85 %) и корректность коррекционных рекомендаций (80 % совпадений с ручными решениями специалиста). При этом среднее время генерации рекомендаций по одному столбцу не превышало 2 секунд на наборе из 10000 записей, что позволяет применять систему в полуавтоматическом режиме на практике.

Таким образом, проведённая оценка подтверждает прикладную состоятельность предложенного подхода

и его применимость для задач повышения качества данных в информационных системах.

Заключение

В данной работе был предложен алгоритм формирования рекомендаций по корректировке аномалий в табличных данных, основанный на комбинированном анализе результатов различных методов обнаружения отклонений и характеристик самих данных.

Проведённый критический обзор методов позволил систематизировать их особенности и выработать обоснованные коррекционные стратегии, которые были сведены в единую систему правил. На основе этих правил был реализован псевдокод алгоритма, адаптируемого под различные сценарии применения.

Также была проведена оценка эффективности алгоритма, которая показала высокую точность и адекватность генерируемых алгоритмом рекомендаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанова И.А., Гудкова Н.В. Подходы к оценке качества данных в информационных системах // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. — 2023. — Т. 27, № 4. — С. 110–117.
2. Вьюгин В.В. Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования. М.: МЦИМО. 2013. 387 с.
3. Иванов П.П., Сидоров В.В. Методы выявления аномалий в больших данных: сравнительный анализ // Информационные технологии. — 2021. — № 7. — С. 60–66.
4. Василенко М.С., Копырин А.С. Алгоритм машинного обучения для детектирования выбросов и аномалий // Modeling of Artificial Intelligence. — 2019. — № 6–1. — С. 13–18.
5. Мосин В.Г. Детекция аномалий информационного канала на основе прогнозирующих моделей в решении задач анализа качества контента / В.Г. Мосин // Современные информационные технологии. — 2024. — № 2. — С. 45–52.
6. Бурков А. Машинное обучение без лишних слов. СПб: Питер, 2020. 192 с.
7. Гололобов Н.В., Павленко Е.Ю. Сравнение эффективности выявления аномалий алгоритмами машинного обучения без учителя // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2022. № 2. С. 135–147
8. Новикова Т.В., Орлов Д.С. Обнаружение аномалий в данных с использованием нейронных сетей // Современные информационные технологии. — 2023. — № 5. — С. 88–94.
9. Петрова Е.Н., Смирнов А.Л. Применение алгоритмов машинного обучения для обнаружения отклонений в финансовых данных // Журнал прикладной информатики. — 2022. — Т. 17, № 2. — С. 75–82.
10. Гусев А.А., Козлов А.В., Соловьев А.А. Обнаружение аномалий в потоках данных с использованием методов машинного обучения // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2020. — № 4. — С. 45–51.

© Михайлов Владимир Денисович (mikhaylov.v.d@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ВИРТУАЛЬНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

FUNCTIONAL MODEL OF A DIGITAL DOUBLE OF A VIRTUAL COMPUTER LABORATORY

**E. Mikheeva
O. Romashkova
S. Chiskidov**

Summary. The article presents a functional model of a digital twin of a virtual computer laboratory integrated with a Learning Management System (LMS). The relevance of this work stems from the need for hands-on practical training in distance learning contexts and the digitalization of the educational environment. The aim is to formalize the processes of providing remote access to laboratory computing resources through digital twin technology. The study describes the integration architecture of an LMS with a cloud-based virtual machine infrastructure, as well as a functional model of the system encompassing user roles (student, teacher, administrator), their actions and interaction scenarios. The proposed model is shown to replicate the functionality of a physical computer lab, enabling students to perform practical assignments remotely without loss of educational quality. The advantages of this approach are highlighted, and potential application areas are discussed. The main results and directions for further system development are presented.

Keywords: digital twin, virtual laboratory, functional model, distance learning, virtual machines, cloud technologies.

Михеева Елена Олеговна

Аспирант, ГАОУ ВО «Московский городской педагогический университет (МГПУ)»
eo.mikheeva@gmail.com

Ромашкова Оксана Николаевна

Доктор технических наук, профессор,
Российская академия народного хозяйства
и государственной службы при Президенте РФ, г. Москва
ox-rom@yandex.ru

Чискидов Сергей Васильевич

Кандидат технических наук, доцент,
ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России»
chis69@mail.ru

Аннотация. В статье представлена функциональная модель цифрового двойника виртуальной компьютерной лаборатории, интегрированной с системой дистанционного обучения (LMS). Актуальность работы обусловлена потребностью в практических занятиях при условии дистанционного обучения и цифровизации образовательной среды. Целью исследования является формализация процессов предоставления удалённого доступа к программно-аппаратным ресурсам учебной лаборатории посредством технологии цифрового двойника. В работе описаны архитектура интеграции LMS с облачной инфраструктурой виртуальных машин, а также модель функционирования системы, включающая роли пользователей (студент, преподаватель, администратор), их действия и сценарии взаимодействия. Предложенная модель обеспечивает эквивалентность функционала виртуальной лаборатории реальному учебному компьютерному классу, позволяя студентам выполнять практические задания удалённо с сохранением качества обучения. Отмечены преимущества подхода и рассмотрены потенциальные области применения. Приведены основные результаты и направления дальнейшего развития системы.

Ключевые слова: цифровой двойник, виртуальная лаборатория, функциональная модель, дистанционное обучение, виртуальные машины, облачные технологии.

Введение

Цифровизация образования и рост потребности в дистанционном обучении обуславливают актуальность разработки виртуальных учебных лабораторий, эквивалентных по возможностям традиционным материально-техническим базам вузов. Концепция цифрового двойника изначально возникла в промышленности, где использовалась для оптимизации производства, и в широком смысле представляет собой цифровую реплику реального физического объекта, обеспечивающую бесперебойный обмен данными между физическим прототипом и его виртуальной моделью. Таким образом, цифровой двойник — это виртуальная

модель системы, процесса или устройства, воспроизводящая состояние и поведение оригинала в режиме реального времени. В последнее десятилетие данный подход стал применим и в образовательной сфере. Такой проект как цифровой двойник компьютерной лаборатории обеспечивает удалённый доступ студентов к реальному оборудованию через веб-интерфейс, изменяя традиционную модель учебного процесса и открывая новые возможности обучения.

Сложность организации практических занятий в распределённых и массовых группах студентов, недостаточное количество оборудования и ограничение доступа к лабораториям стимулирует поиск новых подходов.

Виртуальные симуляторы и удалённые лаборатории стали частичным решением, однако классические симуляторы не взаимодействуют с реальными данными и не обеспечивают эффекта присутствия. Концепция же цифрового двойника ориентирована на воспроизведение реальных условий работы оборудования или системы, что делает её привлекательной для создания полнофункциональных виртуальных учебных лабораторий [1, 2].

Цель исследования — разработать функциональную модель цифрового двойника виртуальной компьютерной лаборатории, интегрированной с LMS, формализующую роли пользователей и процессы взаимодействия.

Задачи исследования включают:

- анализ подходов к интеграции LMS с внешними лабораторными средствами;
- проектирование архитектуры системы с использованием облачных технологий виртуализации;
- описание функциональной модели в нотации UML;
- выявление преимуществ предложенного решения и потенциальных направлений его применения.

В соответствии с целью в работе приведены архитектура интеграции LMS с виртуальной лабораторией и описание функциональной модели системы. Основные результаты были формализованы с помощью диаграмм UML (структурная схема архитектуры, диаграмма прецедентов) и BPMN.

Цифровой двойник как объект моделирования

Цифровой двойник виртуальной компьютерной лаборатории представляет собой совокупность программно-аппаратных компонентов, имитирующих рабочие места для практических занятий по информатике и смежным дисциплинам. Объектом моделирования является типовая учебная компьютерная лаборатория, включающая набор рабочих станций с установленным специализированным программным обеспечением для выполнения лабораторных работ. Физически такая лаборатория обычно реализована в виде класса с компьютерами, объединёнными в сеть и подключёнными к серверу учебной среды или LMS. Цифровой двойник воспроизводит все основные функции и возможности этой лаборатории в виртуальной среде.

В рассматриваемой системе виртуальная лаборатория развернута в виде облачного сервера виртуализации, на котором создаются виртуальные машины, эмулирующие компьютеры лаборатории. Каждая ВМ содержит требуемое специализированное ПО в соответствии с тематикой лабораторной работы. Цифровой двойник охватывает полный жизненный цикл использования этих

виртуальных ресурсов, от их инициализации и конфигурирования под конкретную задачу до мониторинга их состояния в реальном времени, сохранения результатов, и выключения по завершении работы.

Важно подчеркнуть, что цифровой двойник лаборатории действует в тесной связке с образовательным процессом. В отличие от разрозненных симуляторов, цифровой двойник интегрирован с данными учебного курса и контекстом деятельности студентов и преподавателей. Иными словами, состояние виртуальной машины может соответствовать прогрессу выполнения студентом задания, а результаты в виде отчетных файлов и исходного кода передаются обратно в LMS для оценки. Таким обеспечивается удаленное выполнение учебных целей.

С точки зрения моделирования, цифровой двойник виртуальной лаборатории представляет собой многокомпонентную систему, состоящую из подсистем:

- виртуализации в контексте создания и управления виртуальными машинами;
- интеграции с LMS в контексте обмена данными между LMS и виртуальными машинами;
- пользовательского интерфейса в контексте обеспечения взаимодействия пользователей с виртуальной средой через веб-интерфейс LMS).

В совокупности эти компоненты образуют объект, функционально эквивалентный реальной лаборатории, что подтверждает корректность применения понятия «цифровой двойник» в данном контексте.

Архитектура интеграции виртуальной лаборатории с LMS

Для реализации описанного цифрового двойника разработана архитектура, интегрирующая виртуальную лабораторию в состав LMS. Общая архитектура системы представлена на рисунке 1.

Архитектура включает в себя следующие основные элементы:

- веб-интерфейс для пользователей;
- совокупность функциональных модулей LMS;
- модуль интеграции, отвечающий за взаимодействие LMS с сервером виртуализации;
- модуль аутентификации и авторизации;
- базу данных;
- внешний сервер виртуализации, где запускаются виртуальные машины.

Категории пользователей студент и преподаватель работают с системой через единый интерфейс LMS, что обеспечивает целостность пользовательского опыта. Администратор, минуя интерфейс, может взаимодействовать с сервером виртуализации и с другими модулями при необходимости.

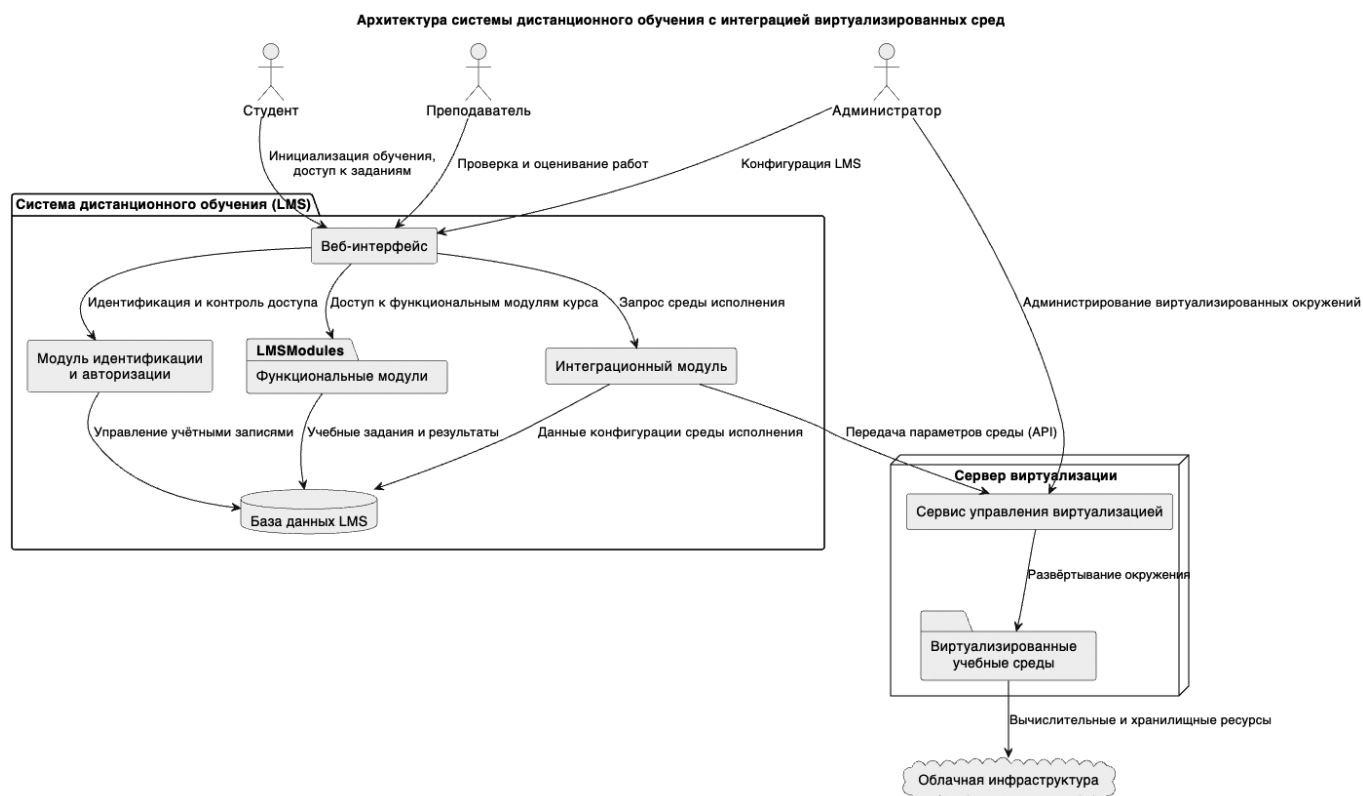


Рис. 1. Архитектура системы дистанционного обучения с интегрированными виртуальными машинами

Система дистанционного обучения играет роль центрального звена архитектуры [2]. В LMS хранится информация о пользователях, курсах, заданиях и результатах. В рамках интеграции разработан специальный LMS-модуль, позволяющий в учебном курсе создавать ссылки или активности, связанные с виртуальной лабораторией. Когда студент инициирует такую активность, LMS через встроенный интеграционный модуль отправляет запрос на сервер виртуализации для подготовки виртуального рабочего окружения.

Интеграционный модуль реализует бизнес-логику обмена, он передаёт параметры и получает от сервера виртуализации данные доступа.

Аутентификация и авторизация пользователей осуществляются средствами LMS. Все категории пользователей входят в систему под своими учётными записями, после чего их роль в рамках курса определяет доступные действия.

Для безопасности интеграционный модуль проверяет права вызывающего пользователя перед выполнением операций. Таким образом, единая система авторизации распространяется и на внешние ресурсы, сессия пользователя в LMS служит основанием для доступа к виртуальной машине без повторного ввода пароля. Данный принцип реализуется с помощью обмена токенами API, позволяющими безопасно передавать

контекст пользователя внешнему инструменту. В результате достигается бесшовная интеграция, где студент или преподаватель переходят к работе в виртуальной лаборатории одним нажатием из LMS.

Сервер виртуализации отвечает за создание, запуск и остановку виртуальных машин. Интеграционный модуль посылает серверу виртуализации команды через API, такие как, создать VM из шаблона, включить или выключить, передать файлы и др. После запуска VM сервер возвращает необходимые данные.

Управление виртуальными машинами и ресурсами включает распределение нагрузки, например, в случае запуска нескольких экземпляров VM при одновременном обращении нескольких студентов, мониторинг производительности и оптимизацию использования облачных ресурсов [3].

Взаимодействие модулей для роли «Студент», представленное на рисунке 2, можно описать следующим образом.

Когда студент открывает задание лабораторной работы в LMS, LMS-модуль через интеграционный модуль отправляет запрос на сервер виртуализации. Последний запускает новый экземпляр виртуальной машины нужной конфигурации VM. Студенту в интерфейсе LMS отображается ссылка или встроенное окно, через кото-

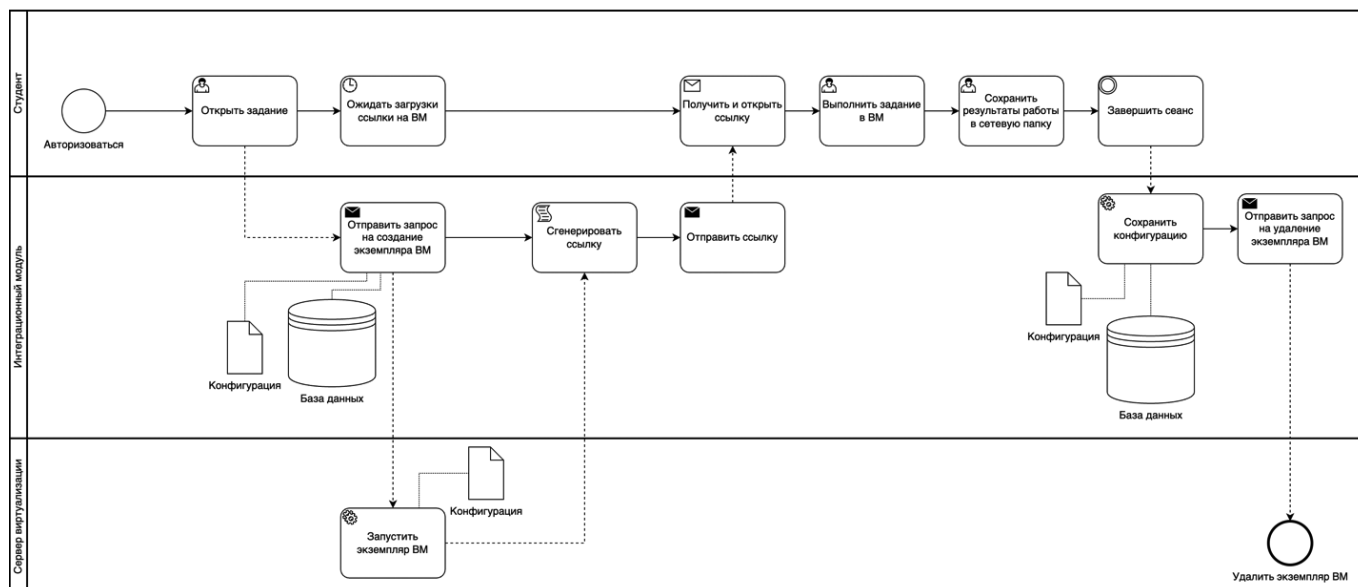


Рис. 2. BPMN-схема взаимодействия роли «Студент» и модулей

рое он получает доступ к виртуальной машине со специализированным ПО (рисунок 1). Все действия внутри VM выполняются студентом в виртуальной среде через удалённый рабочий стол. По завершении работы студент сохраняет результаты внутри VM. Далее студент завершает сеанс. Далее, виртуальная машина отключается и возвращается в исходное состояние, а конфигурация сохраняется для последующего запуска, таким образом освобождая ресурсы для других пользователей.

Таким образом, архитектура обеспечивает взаимодействие полного цикла.

Также важно отметить, что внешний сервер виртуализации изолирован от прямого доступа студентов, то есть все команды проходят через доверенный модуль LMS, что предотвращает несанкционированное использование облачных ресурсов.

Архитектура интеграции, представленная на рисунке 1, закладывает основу для функциональной модели системы, связывая техническую инфраструктуру с пользовательскими сценариями. Ниже рассматриваются роли и действия участников системы более формально, с точки зрения функциональных прецедентов использования.

Функциональная модель

Функционирование системы цифрового двойника виртуальной лаборатории можно описать через набор прецедентов (use case), отражающих типовые действия пользователей в рамках системы [4].

На рисунке 3 показана диаграмма прецедентов, выделяющая три основные пользовательские роли: сту-

дент, преподаватель и администратор. Диаграмма определяет границы системы и демонстрирует, как внешние пользователи взаимодействуют с функциями цифрового двойника. Ниже перечислены основные роли и их действия.

Студент после прохождения аутентификации в LMS получает доступ к курсу и лабораторным работам. Прецедент «Доступ к виртуальным машинам со специализированным ПО» означает возможность запустить через LMS необходимую виртуальную машину для выполнения практического задания. Получив доступ, студент выполняет практические задания в виртуальной среде, используя предоставленные инструменты.

По завершении работы студент сохраняет и передаёт результаты через LMS. Все действия студента требуют наличия активной учётной записи и регистрации на курс и права доступа к соответствующей виртуальной машине, что обеспечивается общим механизмом «Аутентификация и авторизация».

Преподаватель после входа в систему выполняет роль организатора и контролирующего участника лабораторных работ. Один из ключевых прецедентов «Доступ к результатам работы студентов». Преподаватель через интерфейс LMS открывает работы студентов, прикрепленные ими после выполнения заданий на виртуальных машинах. Он может просмотреть результаты, сохранённые студентами. Прецедент «Оценивание работ студентов», где преподаватель выставляет оценки и при необходимости оставляет комментарии или рекомендации. Оценки фиксируются в LMS, что завершает цикл проведения лабораторной работы. Преподаватель формулирует задания, выбирает требуемое ПО и при необходимости инициирует обновление виртуальных

Диаграмма прецедентов интеграции виртуальных машин в LMS

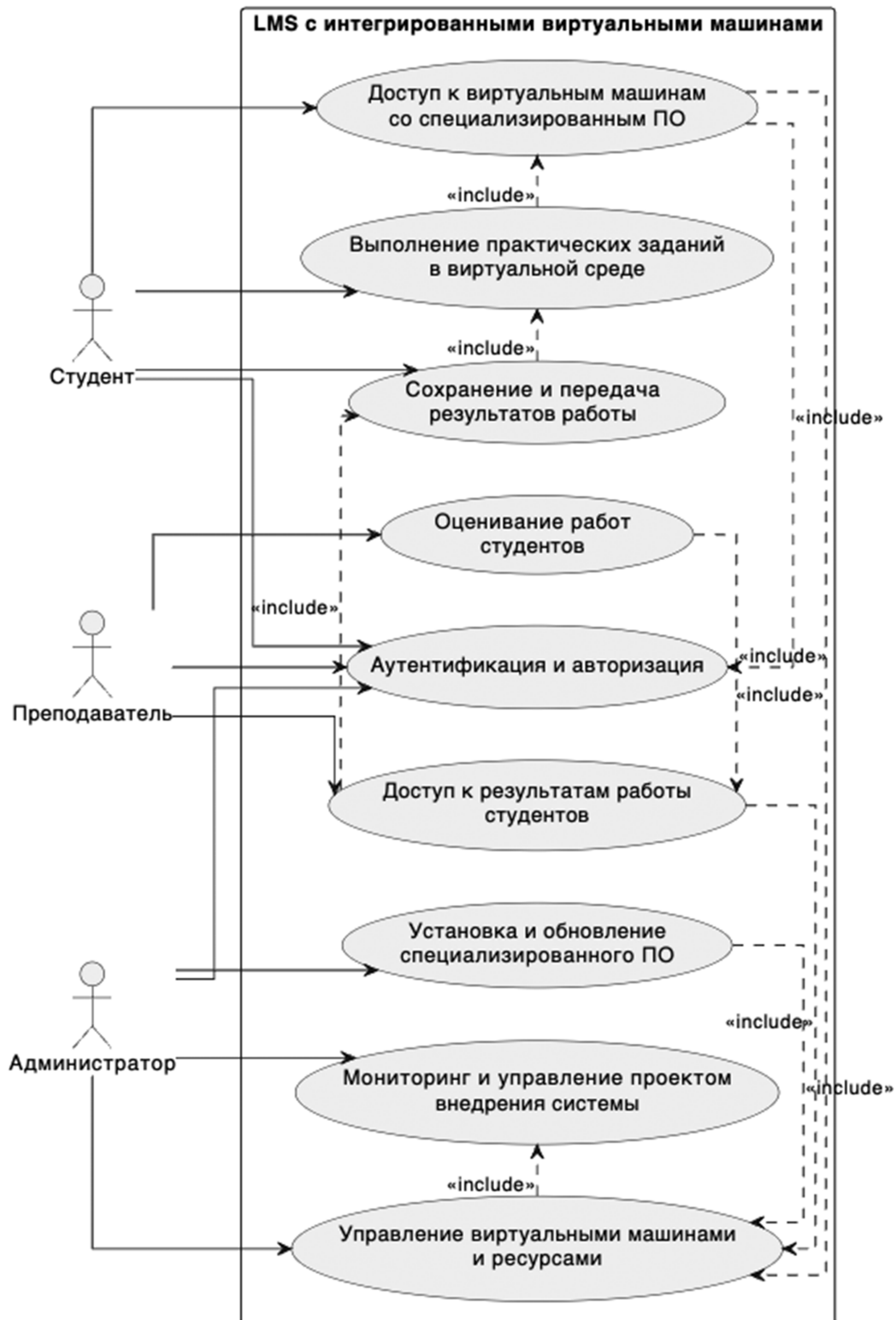


Рис. 3. Схема прецедентов для цифрового двойника компьютерной лаборатории

образов. На диаграмме (рисунок 3) это представлено прецедентом «Установка и обновление специализированного ПО». Данный прецедент выполняется администратором, которому преподаватель ставит задачу.

Администратор обеспечивает техническую поддержку и развитие системы. Прецедент «Управление виртуальными машинами и ресурсами», где администратор контролирует виртуальные машины, а именно, отсле-

живает их состояние, производительность, распределение нагрузки на сервер. Он решает задачи обеспечения достаточного количества одновременно работающих ВМ для запросов студентов, управляет пулом образов виртуальных машин для разных курсов, следит за централизованной установкой и обновлением ПО. Прецедент «Мониторинг и управление проектом внедрения системы» подразумевает общую функцию развития инфраструктуры, где администратор собирает метрики и обеспечивает бесперебойную работу. Кроме того, к обязанностям администратора относится реагирование на инциденты, устранение неполадок, восстановление работоспособности при сбоях и поддержка пользователей при возникновении технических сложностей при доступе к виртуальным машинам и LMS. Прецедент установки и обновления ПО, где администратор готовит образы ВМ с нужным ПО. Таким образом, роли преподавателя и администратора взаимодействуют в процессе поддержки цифрового двойника лаборатории, где преподаватель формулирует учебные потребности, администратор реализует их на техническом уровне.

Следует отметить, что аутентификация и авторизация включены как обязательное условие для всех ключевых действий. Данный механизм гарантирует, что только легитимные пользователи, обладающие правами в соответствии с ролевой моделью, могут выполнять соответствующие действия.

Описанная функциональная модель формализует процессы взаимодействия всех участников системы.

Преимущества и потенциал применения

Интеграция цифрового двойника виртуальной лаборатории в образовательный процесс обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционной организацией лабораторных занятий. Ниже перечислены ключевые из них, а также намечены потенциальные области и сценарии применения разработанной системы.

Виртуальная лаборатория, развернутая в облаке, доступна студентам круглосуточно и из любого места, где есть интернет. В отличие от физического компьютерного класса, ограниченного расписанием и вместимостью, цифровой двойник позволяет организовать работу без привязки ко времени и аудитории [5]. Это особенно актуально для обучающихся, совмещающих учёбу с работой, а также для зарубежных или удалённых студентов. Гибкость во времени повышает вовлечённость, то есть обучаемые могут вне занятий подключиться к виртуальной машине и выполнять задания, доводя навыки до уверенного уровня.

Облачная виртуализация лаборатории обеспечивает практически неограниченную масштабируемость.

Система способна одновременно обслуживать столько студентов, сколько требуется, путем запуска нужного числа виртуальных машин, ограниченного только вычислительными ресурсами облака, которые возможно расширить. Это решает проблему нехватки рабочих мест при большом потоке студентов. Такая модель динамического предоставления ресурсов соответствует современным принципам клауд-компьютинга. Учебное заведение, внедряющее подобную систему, может оптимизировать затраты, вместо оснащения нескольких физических классов дорогими рабочими станциями достаточно арендовать облачные мощности по мере необходимости.

Благодаря интеграции с LMS студенты и преподаватели работают в едином цифровом пространстве. Запуск виртуальной лаборатории осуществляется из кабинета курса, что упрощает организацию обучения. Преподаватель видит прогресс каждого студента, может сопоставить затраченное время и результаты, имеет централизованный журнал оценок. Студенты, в свою очередь, не путаются в множестве аккаунтов и сервисов — авторизация едина. Кроме того, цифровой формат всех действий открывает возможности для сбора и анализа данных об образовательном процессе, то есть LMS фиксирует действия пользователей, и эти данные можно использовать для выявления затруднений, дальнейшего развития и оптимизации.

Цифровой двойник позволяет моделировать такие ситуации, которые затруднительно или рискованно воспроизвести на реальном оборудовании. Студенты могут проводить эксперименты с настройками системы, пробовать различные инструменты без боязни вывести из строя физический компьютер или программную среду в лаборатории [6]. В случае ошибочных действий достаточно перезапустить виртуальную машину или откатиться к исходному образу. С точки зрения безопасности, даже выполнение потенциально опасных операций в виртуальной среде не несёт риска для инфраструктуры вуза, так как всё изолировано внутри ВМ. Таким образом, расширяется диапазон допускаемых учебных экспериментов. В промышленности одним из главных достоинств цифровых двойников является возможность избежать вреда для людей и окружающей среды при испытаниях. В обучении это эквивалентно защите оборудования и самих студентов от нежелательных последствий ошибок, что особенно важно при работе с оборудованием.

Система открывает новые возможности для сотрудничества между образовательными организациями. Университеты могут обмениваться доступом к своим виртуальным лабораториям, предоставляя студентам больше вариантов практики. Например, вуз, не имеющий собственного дорогостоящего программного ком-

плекса, может воспользоваться виртуальной лабораторией партнёрского вуза [7]. Такая модель способствует распространению лучших практик и выравниванию качества образования.

Таким образом, преимущества внедрения цифрового двойника виртуальной лаборатории проявляются на нескольких уровнях:

- для студентов в удобстве и качестве обучения;
- для преподавателей в оптимизации методической работы;
- для администрации в эффективном использовании ресурсов и расширении образовательных услуг.

Данный подход вписывается в общий тренд развития электронного обучения и применения сквозных цифровых технологий в образовании.

Заключение

В ходе проведенного исследования разработана и описана функциональная модель цифрового двойника виртуальной компьютерной лаборатории, интегрированной с системой дистанционного обучения. В модели формализованы основные роли пользователей, сценарии взаимодействия и архитектура системы, обеспечивающая реализацию этих сценариев. Показано, что с помощью предложенной архитектуры достигается полнофункциональная эмуляция учебной лаборатории информатики в онлайн-среде. Цифровой двойник лаборатории воспроизводит не только технические воз-

можности, но и организационные процессы, благодаря тесной связи с LMS.

Основные результаты работы состоят в следующем:

- предложена структура программных модулей и компонентов, позволяющая подключать виртуальные машины к образовательному процессу в LMS;
- представлено формальное описание функционала системы с точки зрения пользователя, охватывающее все стадии проведения лабораторной работы удалённо;
- произведён анализ свойств разработанного решения и показано его превосходство над традиционными подходами в ряде ситуаций.

Практическая значимость полученной модели состоит в возможности её непосредственного внедрения в систему дистанционного обучения для расширения практико-ориентированного обучения.

Таким образом, работа закладывает основу для дальнейших исследований и разработок в области цифровых двойников учебных лабораторий. Совмещение современных технологий облачной виртуализации с потребностями образовательного процесса открывает качественно новые горизонты для организации практических занятий. Предложенная функциональная модель может быть масштабирована и адаптирована для различных дисциплин и учебных условий, способствуя эволюции системы высшего образования в русле цифровой трансформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. El Saddik A. Digital Twins: The Convergence of Multimedia Technologies // IEEE MultiMedia. — 2018. — Vol. 25, no. 2. — P. 87–92.
2. Heradio R. et al. Virtual and Remote Labs in Education: A Bibliometric Analysis // Computers & Education. — 2016. — Vol. 98. — P. 14–38.
3. Павличева Е.Н., Ромашкова О.Н. Информационные процессы поддержки принятия решений в многоуровневых образовательных системах / Москва, 2022.
4. Заболотникова В.С., Ромашкова О.Н. Анализ методов кластеризации для эффективного управления процессами в налоговой службе // Фундаментальные исследования. 2017. № 9–2. С. 303–307.
5. Ромашкова О.Н., Орехова Е.В. Единая образовательная информационная среда организации и поддержки открытого и непрерывного образования // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования. 2016. № 1. С. 128–134.
6. Каптерев А.И., Ромашкова О.Н., Чискидов С.В. Опыт применения факторного и кластерного анализа в цифровой трансформации образования // Вестник МГПУ. Серия: Информатика и информатизация образования. 2022. № 4 (62). С. 29–43.
7. Ломовцев Р.С., Ромашкова О.Н., Пономарева Л.А. Алгоритм интеллектуальной поддержки управленческих решений для региональной образовательной системы // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 10 (71). С. 35–43.

© Михеева Елена Олеговна (eo.mikheeva@gmail.com); Ромашкова Оксана Николаевна (ox-rom@yandex.ru); Чискидов Сергей Васильевич (chis69@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ МАРКИРОВАННОГО СЕТЕВОГО ПОТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЛОСКУТА: АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ И ПРИМЕНЕНИЯ

METHODS FOR PROTECTING MARKED NETWORK TRAFFIC USING THE PATCHWORK TECHNIQUE: RESILIENCE ANALYSIS AND APPLICATION

**L. Molkova
M. Gofman**

Summary. This paper explores attacks on marked network traffic and methods of protecting it using the patchwork technique. A mathematical model for network traffic marking is presented, including the process of marker insertion and detection. The study analyzes the resilience of the method against various types of attacks, including timing perturbations, dummy packet insertion, repackaging, and multi-flow attacks with added noise. Simulation results are provided, confirming the reliability of the proposed approach under varying network conditions.

Keywords: traffic marking, patchwork method, traffic attacks, data protection, network analysis, noise resilience, timing perturbations, bipolar markers.

Молькова Лолита Юрьевна

Аспирант, Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I
lolita-molkova@mail.ru

Гофман Максим Викторович

доктор технических наук, профессор, Петербургский
государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
gofman@pgups.ru

Аннотация. В данной статье рассматриваются атаки на маркированный сетевой поток и методы его защиты с использованием технологии метод лоскута. Приведена математическая модель маркирования сетевого трафика, включая процесс внедрения маркеров и их детектирование. Проанализированы характеристики устойчивости метода к различным видам атак, включая временные возмущения, вставку фиктивных пакетов, переупаковку и многопоточные атаки с добавлением шума. Представлены результаты моделирования, подтверждающие надежность предложенного подхода в условиях изменяющихся параметров сети.

Ключевые слова: маркирование трафика, метод лоскута, атаки на трафик, защита данных, сетевой анализ, устойчивость к шуму, временные возмущения, биполярные маркеры.

Введение

Современные киберугрозы становятся всё более изощрёнными, часто реализуясь в несколько этапов через анонимные или частично контролируемые сети. Злоумышленники используют цепочки скомпрометированных промежуточных узлов, шифрование, переупаковку пакетов и подмену заголовков для сокрытия своей активности и усложнения отслеживания [1–3]. Такие атаки могут быть реализованы через скрытые каналы, и из-за сетевых помех и высокой изменчивости трафика шаблоны атак, содержащиеся в потоке, могут быть искажены или утеряны, делая выявление нарушителя крайне затруднительным [4–6].

Существует два основных подхода к анализу сетевого трафика: активный и пассивный. В активном анализе маркер сетевого потока применяется для оперативного управления потоком данных и повышения уровня защиты, а при пассивном — для наблюдения, выявления аномалий и отслеживания утечек [7–10].

За последние два десятилетия рост сложности сетей, увеличение объёмов передаваемых данных и развитие цифровых угроз стимулировали активные исследования и разработку новых методов мониторинга и управления трафиком. Разрабатываются новые алгоритмы и методы для мониторинга, оценки и управления сетевыми потоками [11], [12]. Современные технологии позволяют анализировать параметры пакетов (размер, интервалы, направление) и с помощью машинного обучения определять типы протоколов [13–16], прогнозировать их использование [17] и обнаруживать аномальное поведение [18], включая кибератаки [19]. Однако пассивные методы анализа могут быть использованы злоумышленниками для получения конфиденциальной информации, таких как посещаемые веб-страницы [20], язык общения в VoIP [21] и даже частичное расшифрование защищённых разговоров [22, 23].

При этом пассивный анализ имеет ряд ограничений: сложность алгоритмов, необходимость большого объёма обучающих данных и уязвимость к манипуляциям с трафиком. В результате стало наблюдаться активное

развитие методов активного анализа [24], включая внедрение водяных знаков сетевого потока для маркировки данных и повышения точности мониторинга [25, 26]. Однако большинство существующих методов предполагают полный контроль над узлом-источником, что на практике мало реализуемо. В условиях частичного контроля или отсутствия прямого доступа к исходному потоку, маркировка должна выполняться на промежуточных узлах, где трафик может быть нестабилен и подвержен внешним воздействиям.

При анализе сетевого трафика важно учитывать статистические особенности параметров передаваемых пакетов. Исследования показывают, что такие характеристики, как размер пакетов и интервалы между ними, нередко следуют логнормальному распределению пакетов. Это объясняется тем, что природа генерации трафика формируется под влиянием множества факторов: объем данных, передаваемых в сети, включая пользовательское поведение, протоколы передачи и особенности приложений [27]. Понимание этих особенностей позволяет не только более точно моделировать сетевую нагрузку, но и разрабатывать эффективные методы внедрения маркеров сетевого потока, минимально искажающих свойства трафика.

Модели распределения сетевого потока

Пакеты в сетевом трафике могут распределяться по различным статистическим законам, наиболее распространенными среди которых являются логнормальное и пуассоновское распределения пакетов в сетевом потоке.

Пуассоновское распределение применяется для описания событий, происходящих с постоянной средней частотой. В применении к сетевому трафику она позволяет моделировать количество пакетов, поступающих в систему за фиксированный промежуток времени. Оно предполагает, что пакеты поступают независимо друг от друга и с постоянной средней интенсивностью, что характерно для трафика с низкими вариациями и равномерной нагрузкой.

Логнормальное распределение лучше использовать в ситуациях, когда размер пакетов, интервалы между ними и другие параметры изменяются в широких пределах, то есть наблюдается значительная изменчивость параметров трафика. Оно хорошо описывает асимметричное поведение с длинным правым хвостом, характерное для трафика с периодическими пиками активности, нестабильной загрузкой каналов и резкими скачками в скорости передачи данных.

Для упрощенных моделей часто используется пуассоновское распределение, однако при необходимости

учета сложных динамических характеристик сетевого трафика предпочтение отдается логнормальному распределению, которое позволяет точнее описывать реальные условия передачи данных. В связи с этим, в данной статье, для моделирования сетевого потока будет использоваться логнормальное распределение пакетов.

Общее описание интервального метода

Интервальный метод маркировки сетевого потока — это способ внедрения водяного знака сетевого потока в сетевой трафик, основанный на изменении временных характеристик передачи пакетов. Сетевой поток разбивается на последовательные интервалы времени фиксированной или переменной длины и в зависимости от заданного шаблона изменяются характеристики пакетов (их наличие, задержку или частоту) внутри каждого интервала [28–33].

Водяной знак сетевого потока кодируется с использованием различий между интервалами: например, наличие пакетов в определенных интервалах может соответствовать биту «1», а их отсутствие — биту «0». Также могут использоваться более сложные схемы, где значение бита определяется числом пакетов, средней задержкой или другими статистическими характеристиками внутри интервала [32, 34].

Интервальный метод и его устойчивость к атакам

В целях защиты маркированного сетевого потока будет использоваться метод лоскута, основанный на интервальном методе. Этот метод демонстрирует высокую устойчивость к различным видам атак и сетевых возмущений, таких как временные возмущения, вставка фиктивных пакетов, потеря пакетов, заполнение пакетов, разделение или смешивание потоков, а также переупаковка пакетов. Ниже рассмотрим, почему использование маркеров сетевого потока данным методом обеспечивает надежность в условиях указанных атак [35–37]:

1. Атака на изменения во временных возмущениях (задержки, изменения временных меток)

Интервальный метод опирается на интервалы между определенными контрольными точками. Это позволяет системе сохранять точность даже при изменении временных характеристик трафика. Благодаря этому даже при варьирующейся задержке передача информации остается отслеживаемой, так как анализ опирается на относительные интервалы, а не фиксированные значения времени.

2. Атака на внедрение ложных пакетов

Вставка ложных пакетов, например, в атаках типа DoS или DDoS, когда в поток вставляются фиктивные данные,

метод сохраняет свою устойчивость. Он ориентирован на распознавание закономерностей между оригинальными пакетами, что позволяет эффективно фильтровать посторонние вставки.

3. Атака на потерю пакетов

Потери отдельных элементов потока не приводят к значительным искажениям в анализе, поскольку ключевым объектом анализа являются интервалы между маркерами, а не каждый конкретный пакет. Это позволяет системе сохранять работоспособность даже в условиях нестабильного соединения.

4. Атака на изменение размеров пакетов

Увеличение объема передаваемых данных (например, при упаковке дополнительных служебных данных) не влияет на корректность функционирования метода, поскольку он не анализирует содержимое или размеры, а только временные характеристики.

5. Атака на разделение и смешивание потоков

Даже при нарушении логической структуры передачи информации, метод продолжает корректно функционировать. Метод ориентируется на последовательность маркеров и интервалы между ними, а не на физическую или логическую организацию сетевого трафика.

6. Атака на переупаковку пакетов

Даже если порядок пакетов изменяется, интервальный метод позволяет восстановить структуру потока, поскольку анализирует временные характеристики последовательности, а не фиксированные позиции пакетов.

Интервальный метод позволяет сетевым системам оставаться устойчивыми к различным видам атак, поскольку он ориентирован на временные закономерности [37]. Это делает метод гибким и надежным инструментом для использования в нестабильных или потенциально скомпрометированных средах.

Атаки на невидимость: многопоточная атака и аддитивный шум

Дополнительно следует рассмотреть атаки на невидимость [17, 36, 37], такие как многопоточная атака, моделируемая путем добавления аддитивного шума в поток. Эти атаки нацелены на сокрытие реальной картины сетевого трафика, усложняя его анализ и маскируя истинные данные.

Многопоточные атаки и добавление шума

Злоумышленники могут генерировать несколько потоков с разными характеристиками, чтобы запутать

систему анализа, усложняя идентификацию реального трафика. Такой метод затрудняет работу систем обнаружения вторжений и снижает эффективность стандартных инструментов анализа.

А также добавление шума может быть использован для заполнения пробелов в трафике или подмены реальных маркеров сетевого потока. Это используется, когда хотят скрыть следы вторжений, фальсифицировать поведение пользователей или затруднить анализ трафика.

Моделирование многопоточной атаки с добавлением шума

Моделирование подобных атак [32, 36, 37] позволяет получить представление о степени надёжности интервального метода в условиях агрессивной внешней среды.

Позволяет проанализировать стабильности метода при искусственном искажении потока и оценить чувствительности алгоритма к внедрённым ложным данным, а также проверить способности восстановления исходной структуры потока при вмешательстве.

Проведение таких испытаний является важным элементом комплексной проверки эффективности метода лоскута и подтверждает его пригодность для использования в задачах сетевой безопасности при наличии сложных угроз и искажений.

Маркирование сетевого потока по методу лоскута

Метод лоскута представляет собой оригинальный, основанный на интервальном методе, способ внедрения маркеров сетевого потока в поток данных путем трансформации его структуры. Этот метод позволяет формировать своеобразные «лоскуты» в потоке, которые обеспечивают выявление изменений, утечек или манипуляций с данными. Основной принцип заключается в скрытом добавлении маркеров, что позволяет эффективно контролировать целостность передаваемых данных.

Модель вектора сетевых пакетов

Вектор сетевых пакетов определяется следующим формулой:

$$p = (p_0, p_1, \dots, p_N), \quad (1)$$

Где p_i - вектор пакетов, попавших в i -й интервал
 N — это количество интервалов

Каждое p_i в векторе пакетов вычисляется по формуле

$$p_i = M * t * v, \quad (2)$$

Где v — случайная величина, имеющая логнормальное распределение

t — длительность временного интервала,

M — максимальное количество пакетов

Модель построения маркера

В этой статье используются две модели построения маркерных последовательностей. Общая структура маркера описывается следующим образом:

$$m = (m_1, m_2, \dots, m_N) = \alpha \otimes (1, -1) \quad (3)$$

Где \otimes — операция кронекерова произведения,

$$\alpha = \left(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{\frac{N}{2}} \right) \text{ — биполярный вектор [38]}$$

Модель внедрения информационного маркера в сетевой поток с использованием принципа лоскута

Формирование маркированного вектора пакетов выполняется по следующей схеме:

$$p_{\text{marker}} = (p'_0, p'_1, \dots, p'_N) \quad (4)$$

Процесс построения маркированного вектора следует данным правилам:

$$(p_{2(i-1)+1}, p_{2i}) = \begin{cases} (p_{2(i-1)+1}, p_{2i}), & \text{если } p_{2(i-1)+1} \geq p_{2i} \text{ и } m_i = 1 \\ (p_{2i}, p_{2(i-1)+1}), & \text{если } p_{2(i-1)+1} < p_{2i} \text{ и } m_i = 1 \\ (p_{2(i-1)+1}, p_{2i}), & \text{если } p_{2(i-1)+1} \leq p_{2i} \text{ и } m_i = -1 \\ (p_{2i}, p_{2(i-1)+1}), & \text{если } p_{2(i-1)+1} > p_{2i} \text{ и } m_i = -1 \end{cases} \quad (5)$$

Формула расчета корреляции между найденным маркером и переданным

Пусть \tilde{m}_n — восстановленный маркер

m_n — оригинальный маркер

Тогда взаимная корреляция задается формулой:

$$R(\tilde{m}, m, k) = \sum_n (\tilde{m}_n \cdot m_{n+k}) \quad (6)$$

Где k — сдвиг, с которым сравниваются элементы восстановленного маркера \tilde{m} и оригинального маркера m . Оригинальный маркер сдвигается вправо на k позиций, после чего оценивается степень совпадения с восстановленным маркером.

Целью является найти тот сдвиг, при котором корреляция максимальна. Это значение соответствует предполагаемой позиции вставки маркера в сетевой поток.

Для того чтобы вынести решения о наличии маркера в потоке используется оценка взаимной корреляции,

а именно отношение максимального значения к минимальному (по модулю):

$$A = \left| \frac{\max_{k \in \{-N, -N+1, \dots, N\}} R(\tilde{m}, m, k)}{\min_{k \in \{-N, -N+1, \dots, N\}} R(\tilde{m}, m, k)} \right| \quad (7)$$

Где $|\cdot|$ — оператор взятия абсолютного значения

A — оценка взаимной корреляции между восстановленным маркером и оригинальным маркером

R — значение корреляции между восстановленным маркером и оригинальным маркером

Если в анализируемом сетевом потоке маркер отсутствует, то величина A близка к 1. Но, если $A \geq t$, где t — порог вынесения решения о наличии маркера в анализируемом сетевом потоке. То, можно вынести решение о наличии маркера в потоке.

Результаты моделирования для сравнительной оценки устойчивости маркирования сетевого потока

Традиционно в качестве α используется псевдослучайная биполярная последовательность. Но в работе [38] предлагается в качестве α использовать следующий вектор

$$\alpha = \beta \otimes \gamma \quad (8)$$

Где γ — специально расширяющаяся последовательность, длиной N_γ , и β — биполярная последовательность, длиной N_β . При этом $N_\beta * N_\gamma = \frac{N}{2}$

Их Кронекерово произведение $\beta \otimes \gamma$ позволяет создать маркер с улучшенными корреляционными свойствами, так как такая конструкция обеспечивает более равномерное распределение битов и высокую чувствительность к нарушению последовательности.

При моделировании использовались были применены два маркера:

1. **Псевдослучайная биполярная последовательность**
2. **Предельная биполярная расширяющаяся последовательность (ПБРП)**, предложенная в работе Гофман М.В. [38].

В качестве первого маркера использовалась псевдослучайная биполярная информационная последовательность определяющаяся уравнением (3), при $N_\beta = 28$ и $N_\gamma = 1$, в котором α — псевдослучайная маркерная последовательность, формируемая генератором с определённым начальным значением. Маркировка внедрялась в поток согласно формулам (4) и (5), а обнаружение про-

изводилось с помощью взаимной корреляции по формулам (6) и (7), используя вектор из (3).

Во втором же маркере применялась **предельная биполярная расширяющаяся последовательность (ПБРП)**, построенная по принципу, описанному в [38]. В этом случае α строится по формуле (8). В частности,

$$\beta = (1, 1, 1, -1, -1, -1)$$

$$\gamma = (-1, -1, -1, -1)$$

Это дает $N_\beta = 7$, $N_\gamma = 4$, что совпадает с длиной маркера, построенного по первому варианту. Соответственно, при таких длинах обоих маркеров они оказываются равными по длине. Построение, внедрение и обнаружение осуществляется согласно формулам (3), (4), (5), (6), (7) и (8).

Анализ результатов моделирования

Графики, представленные в статье, иллюстрируют два типа ошибок при детектировании маркера:

- **Ложноположительные результаты** — ситуация, когда маркер отсутствует, но детектор ошибочно его фиксирует (рис. 1).
- **Ложноотрицательные результаты** — ситуация, когда маркер присутствует, но детектор его не обнаруживает (рис. 2).

Анализ графиков на рисунках 1 и 2 показывает, что при выборе порога равным 1,4 маркер, построенный

на основе ПБРП, демонстрирует лучшие характеристики по сравнению с псевдослучайным маркером. В частности, вероятность ложноположительного срабатывания для ПБРП составляет 0.1394 (13.94 %), в то время как для псевдослучайного маркера она равна 0.1659 (16.59 %). Это свидетельствует о снижении ложных срабатываний на 15.96 %. Аналогично, вероятность ложноотрицательного срабатывания для ПБРП составляет 0.4828 (48.28 %), тогда как для псевдослучайного маркера — 0.7127 (71.27 %), что указывает на снижение данного показателя на 32.29 %.

Использование ПБРП позволяет повысить устойчивость схемы маркирования к ошибкам второго рода и уменьшить вероятность ложного обнаружения, обеспечивая тем самым более высокую надежность выявления маркера в потоке.

Графики показывают, что ПБРП сохраняет высокую детектируемость при изменении параметров шума. В отличие от псевдослучайной биполярной последовательности, предложенная ПБРП демонстрирует более устойчивые характеристики.

Предложенный метод маркирования сетевого потока на основе интервального метода лоскута показывает хорошие результаты при аддитивном логнормальном распределении, обеспечивая надёжность обнаружения маркера в условиях высокой изменчивости сети.

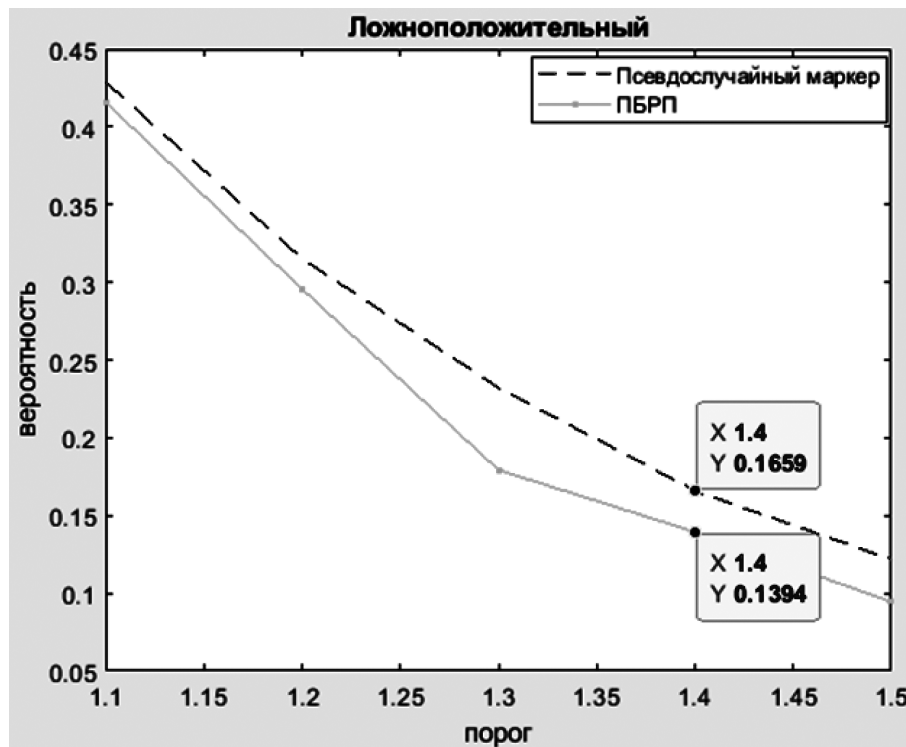


Рис. 1. Ложноположительные результаты

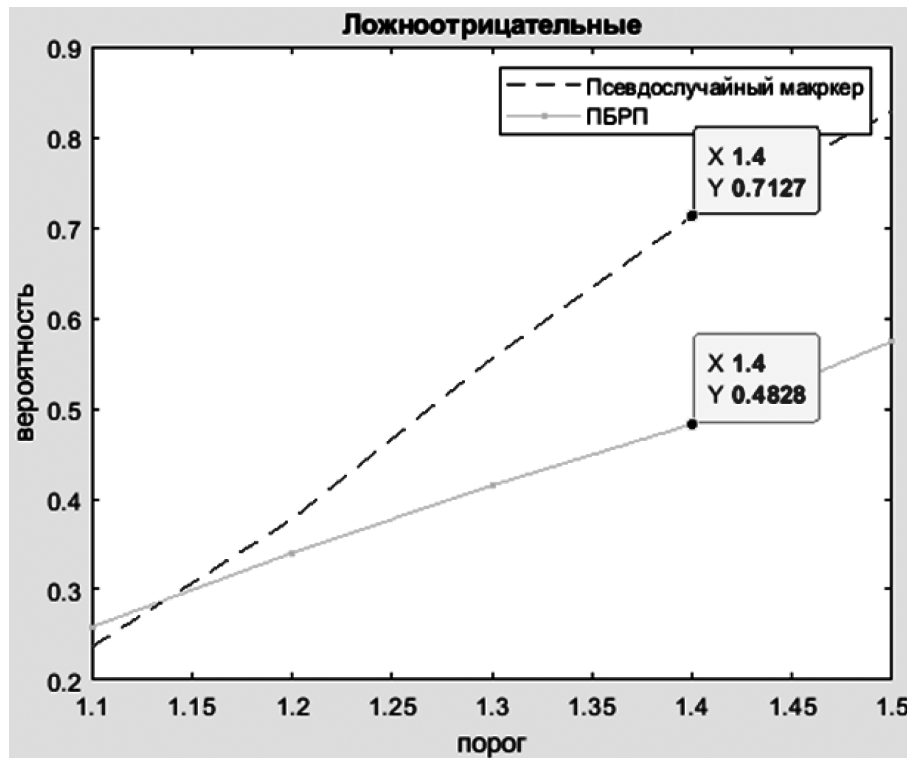


Рис. 2. Ложноотрицательные результаты

Заключение

В данной работе рассмотрен подход к защите сетевого трафика с применением метода лоскута, основанного на интервальном методе маркирования. Разработанная модель продемонстрировала высокую устойчивость к ряду искажений, включая временные возмущения, вставку фиктивных пакетов, потери и переупаковку данных. Особенностью метода является использование

предельной биполярной расширяющейся последовательности (ПБРП) в качестве маркера сетевого потока, что обеспечивает его устойчивость при аддитивном шуме и многопоточным атакам. Результаты моделирования показали, что при логнормальном распределении пакетов в сочетании с использованием ПБРП позволяет достичь высокой точности и надежности обнаружения атак даже в условиях нестабильной и зашумленной сетевой среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Blum A., Song D., Venkataraman S.: 'Detection of interactive steppingstones: algorithms and confidence bounds. Proc. 7th Int. Symp. on Recent Advances in Intrusion Detection, Sophia Antipolis, France, September 2004, pp. 258–277
2. Yuan Y., Ge J., Cheng G. DeMarking: A defense for network flow watermarking in real-time //Computers & Security. — 2025. — C. 104355.
3. Feng W. et al. Ip-peeling: a robust network flow watermarking method based on ip packet sequence //Chinese Journal of Electronics. — 2024. — T. 33. — №. 3. — C. 694–707.
4. Li T. et al. HeteroTiC: A robust network flow watermarking based on heterogeneous time channels //Computer Networks. — 2022. — T. 219. — C. 109424.
5. Wang X. et al. Sleepy watermark tracing: An active network-based intrusion response framework //IFIP International Information Security Conference. — Boston, MA: Springer US, 2001. — C. 369–384.
6. Feng W. et al. HSTW: A robust network flow watermarking method based on hybrid packet sequence-timing //Computers & Security. — 2024. — T. 139. — C. 103701.
7. Fu X. et al. On flow marking attacks in wireless anonymous communication networks //Journal of Ubiquitous Computing and Intelligence. — 2007. — T. 1. — №. 1. — C. 42–53.
8. Yu W. et al. DSSS-based flow marking technique for invisible traceback //2007 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP'07). — IEEE, 2007. — C. 18–32.
9. Karnani S., Agrawal N., Kumar R.A comprehensive survey on low-rate and high-rate DDoS defense approaches in SDN: taxonomy, research challenges, and opportunities //Multimedia Tools and applications. — 2024. — T. 83. — №. 12. — C. 35253–35306.
10. Pan X. et al. Long PN code based traceback in wireless networks //International Journal of Performability Engineering. — 2012. — T. 8. — №. 2. — C. 173.
11. Bates A. Detecting compute cloud co-residency with network flow watermarking techniques. — 2012.
12. Bates A. et al. Detecting co-residency with active traffic analysis techniques //Proceedings of the 2012 ACM Workshop on Cloud computing security workshop. — 2012. — C. 1–12.

13. Zand A. et al. Rippler: Delay injection for service dependency detection //IEEE INFOCOM 2014—IEEE Conference on Computer Communications. — IEEE, 2014. — C. 2157–2165.
14. Houmansadr A., Borisov N. SWIRL: A Scalable Watermark to Detect Correlated Network Flows //NDSS. — 2011.
15. Cheng L.E. I. et al. Survey of network flow identification technology //Application Research of Computers/Jisuanji Yingyong Yanjiu. — 2013. — T. 30. — №. 10.
16. Fu X. et al. On countermeasures to traffic analysis attacks //IEEE Systems, Man and Cybernetics Society Information Assurance Workshop, 2003. — IEEE, 2003. — C. 188–195.
17. Levine B.N. et al. Timing attacks in low-latency mix systems //Financial Cryptography: 8th International Conference, FC 2004, Key West, FL, USA, February 9–12, 2004. Revised Papers 8. — Springer Berlin Heidelberg, 2004. — C. 251–265.
18. Fu C. et al. Delay normalization method of defending against timing-based attacks on anonymous communication systems //J. Southeast Univ., Nat. Sci. Ed. — 2009. — T. 39. — №. 4. — C. 738–741.
19. Zhang L., Wang Z., Liu H. Survey on network flow watermarking technologies //Comput. Sci. — 2011. — T. 38. — №. 11. — C. 7–11.
20. Chen Z., Pu S., Zhu S. Traceback technology for anonymous network //J. Comput. Res. Dev. — 2012. — T. 49. — C. 111–117.
21. Nematollahi M.A. et al. Network stream watermarking //Digital Watermarking: Techniques and Trends. — 2017. — C. 165–179.
22. Mittal P. et al. Stealthy traffic analysis of low-latency anonymous communication using throughput fingerprinting //Proceedings of the 18th ACM conference on Computer and Communications Security. — 2011. — C. 215–226.
23. Wang X., Chen S., Jajodia S. Tracking anonymous peer-to-peer voip calls on the internet //Proceedings of the 12th ACM conference on Computer and communications security. — 2005. — C. 81–91.
24. Park Y.H., Reeves D.S. Adaptive timing-based active watermarking for attack attribution through steppingstones //Proc. Second Int. Workshop on Security in Distributed Computing Systems, Washington, DC, USA. — 2005. — C. 107–113.
25. Houmansadr A., Kiyavash N., Borisov N. Non-blind watermarking of network flows //IEEE/ACM Transactions on Networking. — 2013. — T. 22. — №. 4. — C. 1232–1244.
26. Gong X., Rodrigues M., Kiyavash N. Invisible flow watermarks for channels with dependent substitution, deletion, and bursty insertion errors //IEEE transactions on information forensics and security. — 2013. — T. 8. — №. 11. — C. 1850–1859.
27. Zhang L. et al. Synchronization in inter-packet delay-based flow correlation techniques //J. Comput. Res. Dev. — 2011. — T. 48. — №. 9. — C. 1643–1651.
28. Iacovazzi A. et al. DropWat: An invisible network flow watermark for data exfiltration traceback //IEEE Transactions on Information Forensics and Security. — 2017. — T. 13. — №. 5. — C. 1139–1154.
29. Pyun Y.J. et al. Interval-based flow watermarking for tracing interactive traffic //Computer Networks. — 2012. — T. 56. — №. 5. — C. 1646–1665.
30. Wang X., Yang M., Luo J. A novel sequential watermark detection model for efficient traceback of secret network attack flows //Journal of network and computer applications. — 2013. — T. 36. — №. 6. — C. 1660–1670.
31. Yu L. et al. Dynamic interval-based watermarking for tracking down network attacks //2021 IEEE 21st International Conference on Software Quality, Reliability and Security (QRS). — IEEE, 2021. — C. 52–61.
32. Houmansadr A., Borisov N. BotMosaic: Collaborative network watermark for the detection of IRC-based botnets //Journal of Systems and Software. — 2013. — T. 86. — №. 3. — C. 707–715.
33. Wang X., Chen S., Jajodia S. Network flow watermarking attack on low-latency anonymous communication systems //2007 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP'07). — IEEE, 2007. — C. 116–130.
34. Lin M. et al. Network flow watermarking method based on centroid matching of interval group //2015 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC). — IEEE, 2015. — C. 628–632.
35. Ramsbrock D., Wang X., Jiang X. A first step towards live botmaster traceback //International Workshop on Recent Advances in Intrusion Detection. — Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. — C. 59–77.
36. Ling Z. et al. Novel packet size-based covert channel attacks against anonymizer //IEEE Transactions on Computers. — 2012. — T. 62. — №. 12. — C. 2411–2426.
37. Zhang L. et al. Survey on network flow watermarking: model, interferences, applications, technologies, and security //IET Communications. — 2018. — T. 12. — №. 14. — C. 1639–1648.
38. Гофман М.В., Корниенко А.А. Предельные биполярные последовательности для робастного маркирования цифровых аудиосигналов по методу лоскута //Информатика и автоматизация. — 2023. — T. 22. — №. 2. — C. 221–260.

© Молькова Лолита Юрьевна (lolita-molkova@mail.ru); Гофман Максим Викторович (gofman@pgups.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АРХИТЕКТУРЫ НЕЙРО-НЕЧЁТКИХ СЕТЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЁННЫМИ ЭКОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

NEURO-FUZZY NETWORK ARCHITECTURES FOR ANALYSIS AND CONTROL OF SPATIALLY DISTRIBUTED ENVIRONMENTAL PROCESSES

K. Novikov
N. Yurkov
N. Koshelev

Summary. Background and Objectives. Environmental systems often exhibit complex spatial structures, high variability, and incomplete observations. These features pose significant challenges for predictive and control models. Traditional neural networks show strong data approximation capabilities but lack robustness and interpretability. In this work, we propose a neuro-fuzzy architecture that combines fuzzy logic with neural representations to analyze and manage distributed ecological processes. *Materials and methods.* The model integrates a fuzzy inference system with learnable neural components and is trained on multichannel monitoring data, including atmospheric, soil, and satellite observations. Control signals are formed using both data-driven inference and rule-based reasoning. *Results.* The architecture was tested on tasks of pollution forecasting and ecological load regulation. The model demonstrated improved robustness to missing data and enhanced interpretability of predictions. *Conclusions.* The proposed hybrid system successfully combines expert knowledge with adaptive learning, making it suitable for real-world ecological decision support under uncertainty.

Keywords: neuro-fuzzy systems, spatially distributed processes, environmental modeling, sustainable control, intelligent systems.

Новиков Кирилл Сергеевич

Аспирант,

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

kirill1novikov1@gmail.com

Юрков Николай Кондратьевич

Доктор технических наук,

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

yurkov_NK@mail.ru

Кошелев Никита Дмитриевич

Аспирант,

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

koshlensky@gmail.com

Аннотация. Актуальность и цели. Экологические системы часто характеризуются сложной пространственной структурой, высокой изменчивостью и неполнотой наблюдений. Это ставит особые требования к моделям, предназначенным для анализа и управления такими процессами. Классические нейросетевые подходы демонстрируют хорошую аппроксимацию данных, но недостаточно устойчивы к неопределённости и плохо интерпретируемы. В настоящей работе рассматривается архитектура нейро-нечёткой сети, объединяющая преимущества нечёткой логики и способности нейронных моделей выявлять скрытые зависимости в пространственно-распределённых экологических данных. *Методы.* Предложен гибридный подход, включающий нейро-нечёткий механизм принятия решений, обучаемый на многоканальных данных мониторинга: атмосферных, почвенных и спутниковых. Управляющие воздействия формируются с учётом как нечётких правил, отражающих экспертные знания, так и данных, полученных из наблюдений. *Результаты.* Архитектура протестирована на задачах прогнозирования распространения загрязнений и управления нагрузкой на уязвимые участки ландшафта. Показано улучшение устойчивости модели к пропущенным данным и повышение интерпретируемости прогнозов. *Вывод.* Предложенный метод позволяет объединить экспертную логическую структуру с обучаемыми компонентами, что особенно важно для систем поддержки принятия решений в условиях экологической неопределённости.

Ключевые слова: нейро-нечёткие системы, пространственно-распределённые процессы, экологическое моделирование, устойчивое управление, интеллектуальные системы.

Введение

Вопросы устойчивого управления экологическими системами всё чаще встают не как абстрактные научные задачи, а как реальные вызовы: от прогнозов загрязнения до локальной стабилизации природных комплексов. В основе таких процессов — пространственно-распределённая динамика, подверженная мно-

жеству воздействий и влияний, зачастую слабо поддающихся точному измерению. [1, с. 256; 2, с. 47; 3, с. 224]

Актуальность исследования связана с необходимостью инструментов, способных адаптивно учитывать как данные наблюдений, так и не формализуемую экспертную оценку. Особенно важно это в условиях неполных или искажённых входных данных, характерных для

многих экологических систем, включая лесные массивы, прибрежные зоны и урбанизированные территории. [4, с. 684; 5, с. 592]

Существующие нейросетевые подходы обеспечивают высокую точность на тестовых выборках, но их интерпретируемость и устойчивость к шуму оставляют желать лучшего. [2, с. 53] Нечёткие системы, напротив, отражают структуру экспертных рассуждений, но страдают от ограниченной обучаемости. Потребность в интеграции этих подходов — не просто модный тренд, а прямое следствие сложности реальных экологических задач.

Целью исследования является разработка архитектуры нейро-нечёткой сети, способной обобщать пространственные зависимости, сохранять устойчивость к неполноте данных и обеспечивать интерпретируемое управление динамикой экологических процессов.

Для описания пространственной диффузии загрязняющих агентов в рамках модели была использована аппроксимация на основе гибридного оператора сглаживания:

$$u(x, y, t) = \int_{\Omega} K_{\sigma}(x - \xi, y - \zeta) \cdot c(\xi, \zeta, t - \tau) d\xi d\zeta, \quad (1)$$

где $u(x, y, t)$ — оценка концентрации вещества в точке (x, y) в момент времени t ; $c(\xi, \zeta, t - \tau)$ — запаздывающая функция концентрации; K_{σ} — ядро Гаусса с параметром рассеивания σ ; Ω — область интегрирования по пространственным переменным.

Такой подход позволяет обойти необходимость явно задания коэффициентов диффузии, заменяя их на статистически устойчивое ядро, обучаемое в процессе оптимизации.

Кроме того, в нейро-нечёткую архитектуру встроен адаптивный модуль усиления влияния входных признаков:

$$\hat{x}_i = \frac{x_i}{1 + \lambda \cdot |x_i|}, \quad (2)$$

где \hat{x}_i — нормализованный входной признак; x_i — исходное значение признака; λ — коэффициент адаптации, обучаемый совместно с остальными параметрами.

Материалы и методы

Работа опирается на идею объединения нейросетевой аппроксимации с нечёткой логикой принятия решений в рамках единой архитектуры. Пространственно-распределённые экологические процессы обладают как наблюдаемыми, так и скрытыми составляющими: влияние ландшафта, распределённые эмиссии, локальные

погодные аномалии. Для их моделирования использовалась архитектура нейро-нечёткой сети, реализующая двухуровневый механизм обработки: на первом уровне выявляются скрытые зависимости, на втором — формируются управляющие сигналы на основе гибких правил, имитирующих рассуждение эксперта.

Архитектура модели строится по принципу модульной гибридизации. Сначала происходит пространственно-временное кодирование входных признаков через нейросетевую модуль свёрточного типа. [4, с. 684] Затем, на основе полученного латентного представления, нечёткая подсистема активирует правила в терм-пространстве.

Формально, активация термов в нечётком пространстве происходит по экспоненциальной модели:

$$\mu_j(x) = \exp\left(-\frac{(x - c_j)^2}{2\sigma_j^2}\right), \quad (3)$$

где $\mu_j(x)$ — степень принадлежности входного признака x к j -му терму; c_j — центр терма.

Оценка согласованности между входом и базой правил осуществляется через нормализованную сумму активаций:

$$\alpha_j = \frac{\mu_j(x)}{\sum_k \mu_k(x)}. \quad (4)$$

Каждое нечёткое правило обрабатывает вектор признаков и формирует элементарное решение, которое затем агрегируется. Агрегация производится через обучаемую линейную комбинацию с нелинейным затуханием:

$$y = \sum_{j=1}^M \alpha_j \cdot f_j(z), f_j(z) = \tanh(W_j z + b_j), \quad (5)$$

где z — скрытое представление входных признаков; f_j — выход нечёткого правила, y — итоговый отклик модели.

Для подавления переобучения и повышения устойчивости к шуму на этапе кодирования признаков использовалась стохастическая маскировка входа, описываемая уравнением:

$$x'_i = x_i \cdot I[r_i > p], r_i \sim \mathcal{U}(0, 1). \quad (6)$$

Для обучения и тестирования модели использовались пространственно-распределённые наблюдения, полученные из открытых источников мониторинга и спутниковых систем. Все данные были интерполированы на единую сетку, чтобы избежать искажения градиентов в пространстве. Подробная характеристика используемых источников приведена ниже:

Таблица 1.

Описание выходных данных

Источник	Тип информации	Пространственное разрешение	Временной шаг	Формат
Станции мониторинга	Концентрации NO ₂ , SO ₂ , PM _{2.5}	5 км	1 час	CSV
Спутники Sentinel-2	Поверхностное альbedo, вегетация	10 м	1 сутки	GeoTIFF
ERA5 (ECMWF)	Температура, давление, скорость ветра	30 км	1 час	GRIB
Цифровые модели рельефа	Высота над уровнем моря	90 м	—	GeoTIFF

Для сведения всех признаков к сопоставимому масштабу применялась адаптивная нормализация на основе среднего абсолютного отклонения:

$$x_i^* = \frac{x_i - \text{med}(x)}{\text{MAD}(x) + \mu}. \quad (7)$$

Оптимизация параметров модели проводилась методом градиентного спуска с импульсом, адаптированным к нечёткой логике. Весовые коэффициенты правил и нейросетевых блоков обновлялись по следующей формуле:

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \eta \cdot \nabla L(\theta_t) + \mu \cdot \theta_t, \quad (8)$$

где θ_t — параметры на интеграции t ; η — скорость обучения; μ — коэффициент импульса, $\nabla L(\theta_t)$ — градиент функции потерь.

Функция потерь включала два компонента: регрессионную ошибку и регуляризатор, обеспечивающий плавность управляющего воздействия:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 + \lambda \sum_{t=1}^{T-1} |\hat{y}_{t+1} - \hat{y}_t|^2, \quad (9)$$

где y_i — истинное значение, \hat{y}_i — предсказание модели, N — объём обучающей выборки, T — временной горизонт, λ — коэффициент регуляризации.

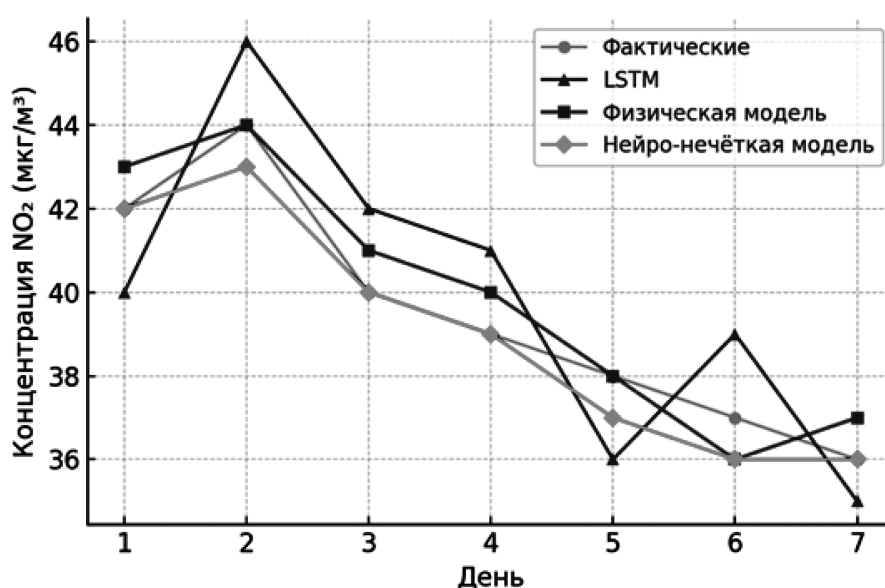
Результаты

Оценка эффективности предложенной нейро-нечёткой архитектуры проводилась в контексте двух задач: прогноза пространственного распределения загрязняющих веществ и формирования управляющих воздействий на динамику нагрузки в уязвимых участках природных систем. В каждом из сценариев тестировалась способность модели к устойчивому обобщению при неполных данных, интерпретируемости её решений и сохранению физической непротиворечивости вывода.

В качестве основной метрики ошибки прогноза использовалась средневзвешенная пространственно-временная квадратичная ошибка, учитывающая плотность наблюдений:

$$\text{W-MSE} = \frac{1}{\sum_{i,t} w_{i,t}} \sum_{i,t} w_{i,t} \cdot (y_{i,t} - \hat{y}_{i,t})^2. \quad (10)$$

Была также рассчитана метрика согласованности управляющих воздействий во времени, позволяющая оценить, насколько резко меняется модельное управление при незначительных изменениях входа:

Рис. 1. Сравнение прогнозов концентрации NO₂ для разных моделей

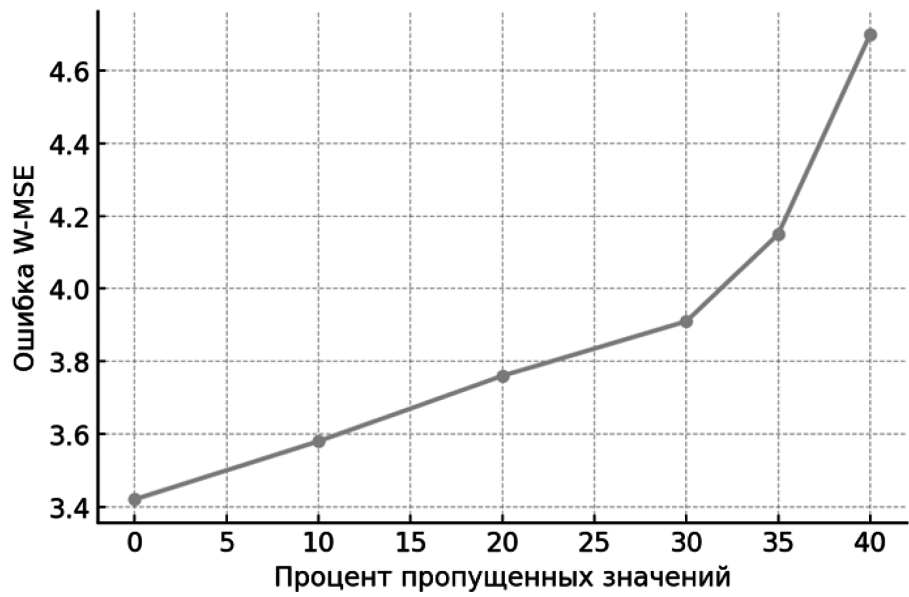


Рис. 2. Устойчивость к пропущенным значениям во входных данных

$$S_{dyn} = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^{T-1} |u_{t+1} - u_t|^2, \tag{11}$$

где u_t — вектор управляющего воздействия в момент t ; T — длина временного ряда.

На основе входных данных по метеопараметрам, топографии и предыдущих наблюдений была обучена модель на задаче краткосрочного прогноза распределения NO₂ в регионе с выраженной антропогенной нагрузкой. Результаты сравнивались с базовой LSTM-моделью и физическим симулятором на основе уравнений переноса.

На графике выше приведено сравнение реальных и предсказанных концентраций в контрольной точке в течение 7 суток (см. рис. 1).

Ошибка модели оказалась существенно ниже: средняя W-MSE составила 3.42, против 6.15 у LSTM и 4.78 у физической модели.

Таблица 2.

Сравнение метрик

Модель	W-MSE	Временная согласованность S _{dyn}	Степень интерпретируемости
LSTM	6.15	0.038	низкая
Физическая модель	4.78	0.021	высокая
Нейро-нечёткая модель	3.42	0.014	высокая

Особый интерес представляла реакция модели на выпадение части данных. Искусственно из обучающей выборки удалялись значения признаков в случайно выбранных участках. На рисунке 2 показано, как меня-

ется ошибка W-MSE в зависимости от доли недостающих данных.

Нейро-нечёткая модель демонстрировала устойчивое поведение вплоть до 35 % пропущенных значений, при этом рост ошибки был умеренным, а карта управляющих воздействий сохраняла квазистационарную структуру.

Для анализа пространственного распределения остаточной ошибки использовалась карта средней ошибки по участкам сетки:

Меньшие значения остатка наблюдаются в зонах с наибольшей плотностью наблюдений, что говорит о способности модели к локальному уточнению оценки при наличии информации.

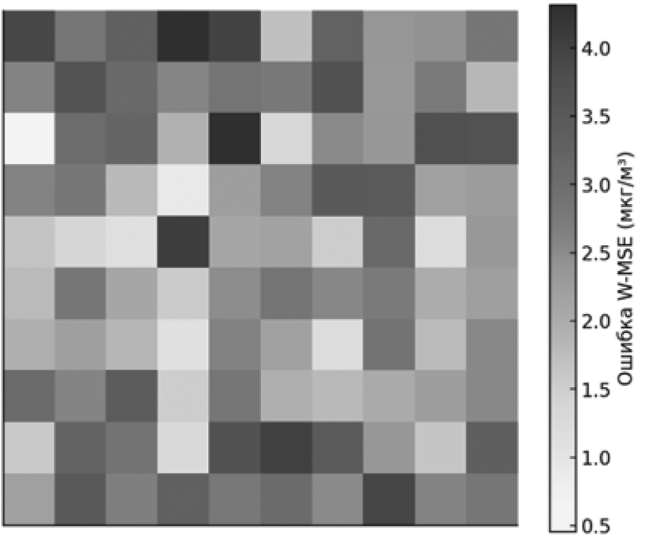


Рис. 3. Тепловая карта остаточной ошибки модели по региону прогнозирования

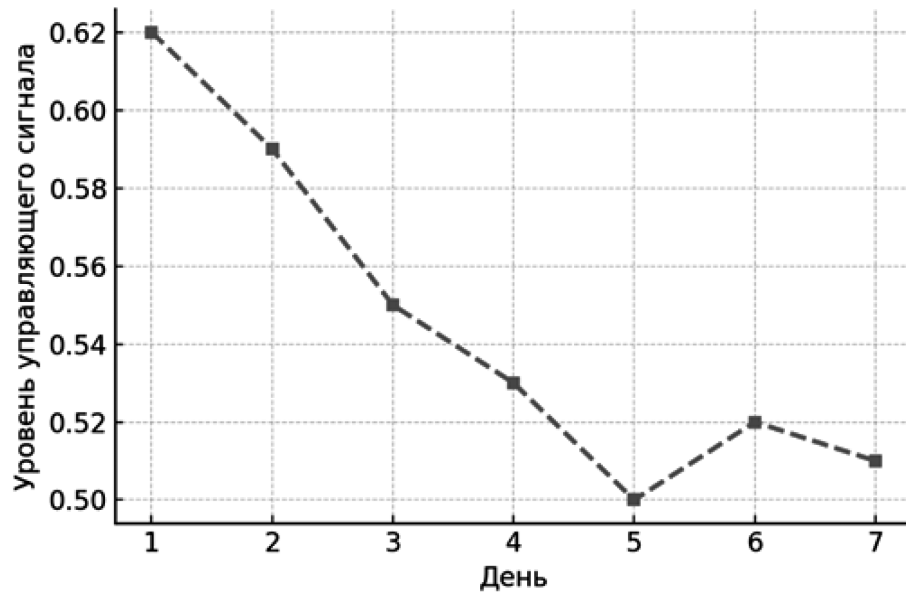
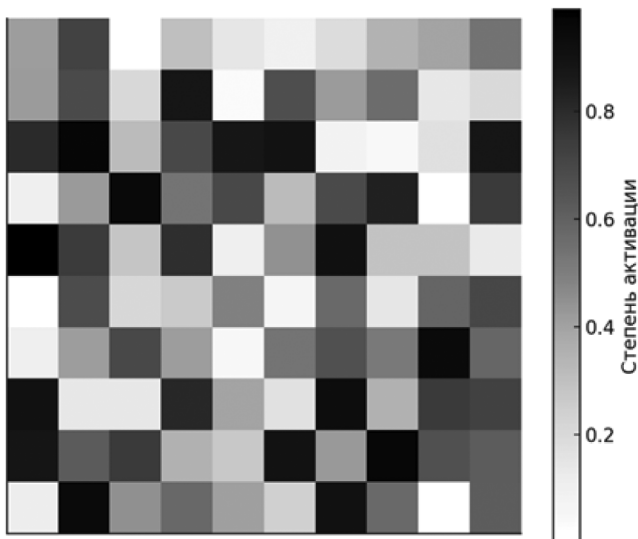


Рис. 4. Динамика управляющего сигнала для снижения экологической нагрузки


 Рис. 5. Пространственное распределение активных термов в момент времени $t = 3$

В задачах управления модель обучалась формировать сигналы для минимизации пространственного превышения нормативов. Уровень воздействия определялся на основе агрегированной функции риска, оценивающей интеграл превышения предельных значений:

$$R(t) = \int_{\Omega} \max(0, c(x, y, t) - c_{norm}) dx dy. \quad (12)$$

По сравнению с LSTM-моделью, нейро-нечёткая система выдавала более плавные и предсказуемые управляющие сигналы. Ниже показан график изменения управляющего воздействия по дням (см. рис. 4).

Одним из ключевых эффектов предложенной архитектуры стала возможность анализа влияния термов на итоговое решение. Для отдельных временных срезов проводился анализ весов правил α_j , который позволял явно проследить, какие входные условия активировали конкретные логические схемы.

На рисунке ниже показан пример распределения весов термов в пространстве:

Заключение

Предложенная нейро-нечёткая архитектура продемонстрировала устойчивую работу при анализе и управлении пространственно-распределёнными экологическими процессами. В отличие от классических нейросетей, модель не теряет точности при пропущенных данных и позволяет интерпретировать механизм принятия решений, что особенно важно в прикладных задачах экологии.

Система показала способность формировать согласованные управляющие сигналы и корректно реагировать на пространственные особенности входных данных. Это открывает возможности её использования в реальных сценариях — от мониторинга загрязнений до локального природопользования.

В дальнейшем планируется развитие модели в направлении учёта неопределённости и расширения физических ограничений, что позволит повысить надёжность в более широком классе задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прокофьев С.В., Кузнецов Н.Н. Нечёткие системы и их применение в задачах управления сложными объектами. — М.: Наука, 2017. — 256 с.
2. Иванов А.А., Смирнов П.А. Интеллектуальные методы анализа экологических данных // Вестник Московского государственного университета. Серия «Экология». — 2020. — № 2. — С. 45–53.
3. Редько В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепции эволюционной кибернетики. — М.: Ленанд, 2019. — 224 с.
4. Mendel J.M. Uncertain Rule-Based Fuzzy Systems: Introduction and New Directions. — Cham: Springer, 2017. — 684 p.
5. Zadeh L.A. Fuzzy logic and its application to approximate reasoning // Information Processing 74: Proceedings of the IFIP Congress. — Amsterdam: North-Holland, 1974. — P. 591–594.

© Новиков Кирилл Сергеевич (kirill1novikov1@gmail.com); Юрков Николай Кондратьевич (yurkov_NK@mail.ru);
Кошелев Никита Дмитриевич (koshlensky@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СТАТИСТИЧЕСКИЕ И МАШИННЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АРХИТЕКТУР

STATISTICAL AND MACHINE LEARNING APPROACHES TO DYNAMIC PROCESS CONTROL BASED ON HYBRID NEURAL NETWORK ARCHITECTURES

K. Novikov
N. Yurkov
N. Koshelev

Summary. Background and Objectives. Controlling complex dynamic systems under uncertainty requires models that combine precision, adaptability, and interpretability. Classical methods rely on predefined equations and constraints but often lose efficiency when observations are incomplete or operating regimes shift. On the other hand, machine learning methods offer flexibility but may fail to provide reliable control. This study aims to develop a hybrid neural network architecture that integrates principles of optimal control and statistical modeling. *Materials and methods.* The proposed model comprises two primary components: a dynamics prediction module and a trainable control unit. The training process optimizes a joint loss function that includes prediction accuracy and control effort minimization. Evaluation metrics include MSE, MAE, determination coefficient R^2 , and deviation from target states. *Results.* The hybrid model reduced MSE by 51 % compared to an LSTM and by 41 % relative to the LQR approach. The average deviation from the target state decreased by 32 %, while control energy was reduced. Under regime shifts, maximum trajectory deviation was cut by half. *Conclusions.* The proposed hybrid approach successfully combines the structural reliability of classical control with the flexibility of neural networks. It is applicable to autonomous regulation, predictive control, and system adaptation tasks where both precision and interpretability are critical.

Keywords: hybrid neural networks, dynamic system control, optimal control, statistical modeling, trainable regulators, nonlinear dynamics, adaptive architectures.

Новиков Кирилл Сергеевич

Аспирант,

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

kirill1novikov1@gmail.com

Юрков Николай Кондратьевич

Доктор технических наук,

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

yurkov_NK@mail.ru

Кошелев Никита Дмитриевич

Аспирант,

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

koshlensky@gmail.com

Аннотация. Актуальность и цели. Управление сложными динамическими системами в условиях неопределённости требует моделей, способных совмещать точность, адаптивность и интерпретируемость. Традиционные методы опираются на априорные уравнения и ограничения, но теряют эффективность при частичной наблюдаемости или изменении режима. Машинные методы, в свою очередь, обладают гибкостью, но не гарантируют корректного управления. Целью данной работы является разработка гибридной нейросетевой архитектуры, способной интегрировать принципы оптимального управления и статистического моделирования. *Материалы и методы.* В структуру модели включены два ключевых компонента: модуль предсказания динамики и обучаемый регулятор. Обучение проводится с учётом совместного критерия, включающего точность состояния и минимизацию управляющего воздействия. В качестве метрик использованы MSE, MAE, коэффициент детерминации R^2 и отклонение от целевого состояния. *Результаты.* Модель продемонстрировала снижение MSE на 51 % по сравнению с LSTM и на 41 % по сравнению с LQR. Среднее отклонение от цели уменьшилось на 32 %, при этом энергетическая эффективность управления улучшилась. В сценариях с изменением режима достигнуто двукратное снижение максимального отклонения от траектории. *Выводы.* Гибридный подход объединяет структурные достоинства традиционного управления с адаптивностью нейросетевых методов. Он может применяться в задачах автономного регулирования, предсказательного контроля и системной адаптации, где важны как точность, так и интерпретируемость.

Ключевые слова: гибридные нейросети, управление динамическими системами, оптимальное управление, статистическое моделирование, обучаемые регуляторы, нелинейная динамика, адаптивные архитектуры.

Введение

Современные задачи управления динамическими процессами в технических и природных системах характеризуются высокой размерностью, стохастичностью и временной изменчивостью. Примеры таких процессов включают управление движением автономных систем, адаптацию технологических устано-

вок к внешним воздействиям, регулирование потоков в транспортных сетях и оптимизацию энергопотребления в умных сетях. В условиях неопределённости и ограниченности измерений традиционные методы управления, основанные на жёстких математических моделях, оказываются недостаточно гибкими и чувствительными к контексту. [1, с. 119; 2, с. 287; 3, с. 711]

С другой стороны, статистические и машинные методы, включая нейросетевые подходы, позволяют выявлять скрытые закономерности в данных и строить аппроксимирующие модели, способные к генерализации и адаптации. Однако при использовании исключительно обучаемых моделей возникает риск потери физической и структурной интерпретируемости, а также нарушений устойчивости и управляемости. [1, с. 119]

Наиболее перспективным направлением является построение гибридных нейросетевых архитектур, в которых машинное обучение сочетается с апробированными методами теории управления. [6, с. 118] Такие модели могут использовать как данные наблюдений, так и априорные знания в виде уравнений динамики, ограничений управления или функционалов цели. Особый интерес представляют архитектуры, интегрирующие элементы оптимального управления и статистического моделирования в единую обучаемую структуру.

Пусть динамическая система описывается в обобщённом виде как:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), w(t)), x(0) = x_0. \quad (1)$$

В задачах управления целью часто является минимизация функционала:

$$J = \int_0^T (x^\top(t) Q x(t) + u^\top(t) R u(t)) dt, \quad (2)$$

где Q и R — весовые матрицы. Проблема заключается в том, что реальные функции и статистика $w(t)$ неизвестны, а оптимальные $u(t)$ невозможно получить аналитически.

Гибридный подход заключается в том, чтобы аппроксимировать структуру оптимального управления при помощи обучаемой модели:

$$\hat{u}(t) = \mathcal{N}_\theta(x(t)), \quad (3)$$

где \mathcal{N}_θ — нейросетевая модель с параметрами θ , обучаемыми на данных траекторий и управляющих воздействий. При этом модель может быть дополнена регуляторами, обеспечивающими соблюдение физических ограничений или требований устойчивости системы.

Актуальность исследования определяется необходимостью создания универсальных подходов к управлению, способных сочетать высокую адаптивность с интерпретируемостью и устойчивостью. В отличие от чисто эмпирических моделей, гибридные нейросетевые архитектуры позволяют не только предсказывать поведение системы, но и формировать управляющие воздействия с учётом ограничений, динамики и шумов.

Целью данной работы является разработка и исследование гибридной нейросетевой архитектуры для управления нелинейными динамическими системами, с использованием как статистического обучения, так и структурных ограничений из теории управления.

Материалы и методы

Построение управляемой модели для сложных динамических процессов требует интеграции нескольких типов знаний — эмпирических наблюдений, физических ограничений и структуры управления. Применительно к рассматриваемому классу систем, динамика которых подвержена нелинейным влияниям и стохастическим возмущениям, предложенная архитектура сочетает элементы обучаемой нейросети с встраиваемыми управляющими механизмами.

В отличие от типичных рекуррентных моделей, таких как LSTM или GRU, здесь управление и предсказание состояния осуществляются раздельно, через параллельно функционирующие блоки. Первый из них реализует аппроксимацию неизвестной динамики по наблюдаемым данным, второй — принимает решения о воздействии на систему, опираясь на внутренние представления об оптимальности.

Математическая формализация

В основу модели положено предположение о наличии скрытой динамики, которую невозможно явно задать аналитически, но можно приближённо восстановить из данных. Пусть наблюдаемый процесс описывается системой вида:

$$x_{t+1} = \Phi(x_t, u_t) + \xi_t, \quad (4)$$

где x_t — вектор состояния на момент времени t , u_t — управляющее воздействие, ξ_t — вектор стохастических возмущений, а Φ — аппроксимируемая модель перехода. Архитектура сети проектируется таким образом, чтобы обучаемая функция $\Phi \approx \Phi_\theta$ обеспечивала минимизацию прогноза ошибки состояния на шаг вперёд.

Управление при этом строится как результат оптимизации квазилинейного функционала, ориентированного на достижение состояния, близкого к заданной цели x^* , с учетом ограничений на интенсивность управления. Целевая функция в общем виде записывается как:

$$\mathcal{L}_{cr} = \sum_{t=0}^{T-1} |x_{t+1} - x^*|^2 + \lambda |u_t|^2. \quad (5)$$

Здесь первый слагаемый отражает точность приведения системы к целевому состоянию, а второй вводит штраф за чрезмерную энергию управления. Параметр

$\lambda > 0$ регулирует компромисс между достижением цели и стоимостью управления.

Общий функционал обучения объединяет две составляющие: динамическую ошибку модели и ошибку управления. Соответственно, полная функция потерь принимает вид:

$$\mathcal{L}_{total} = \pm \mathcal{L}_{dyn} + \beta \mathcal{L}_{ctrl}, \quad (6)$$

где $\mathcal{L}_{dyn} = \sum_{t=0}^{T-1} |x_{t+1} - \Phi_0(x_t, u_t)|^2$ — ошибка предсказания следующего состояния, а коэффициенты α , β подбираются эмпирически или в ходе валидации модели.

Для обучения гибридной архитектуры использовались временные ряды, отражающие поведение управляемых процессов под воздействием различных стратегий. [4, с. 840; 5, с. 348] Особенность модели состоит в её способности извлекать как краткосрочные зависимости в данных, так и долгосрочные тренды, проявляющиеся при изменении внешней среды или стратегии управления. Предобработка данных включала стандартные процедуры фильтрации, нормализации и временного выравнивания. Особое внимание уделялось борьбе с зашумлённостью и аномальными точками, способными существенно исказить обучение модели. В таблице 1 приведены ключевые характеристики архитектуры модели и используемых входных данных.

В качестве метода оптимизации использовался адаптивный градиентный алгоритм Adam, модифицированный под задачу управления с прогнозом. Для стабили-

Таблица 1.

Конфигурация модели и спецификация данных для обучения

Компонент	Описание
Размерность состояния n	Зависит от задачи (от 4 до 20)
Глубина нейросети	3 скрытых слоя, <i>ReLU</i>
Длина окна T	10–50 шагов
Тип входных данных	Временные ряды состояний и управлений
Метод оптимизации	Adam (с модификацией)
Регуляризация	L2 + контроль на градиент (clip)
Обновление параметров	формула (7)

зации процесса использовались техника градиентного клиппинга и регуляризация по параметрам:

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \eta \nabla L + \mu \theta_t, \quad (7)$$

где η — шаг обучения, а μ — коэффициент L2-регуляризации. Обучение проводилось на батчах длиной 32–64 точки, с ранней остановкой на основе валидационного функционала управления.

На рисунке 1 показано, как изменяется значение функций потерь в процессе оптимизации, что подтверждает успешную сходимость обучающей процедуры и баланс между компонентами ошибки.

Эксперименты и результаты

Эффективность разработанной гибридной модели оценивалась в задаче управления системой с нелиней-

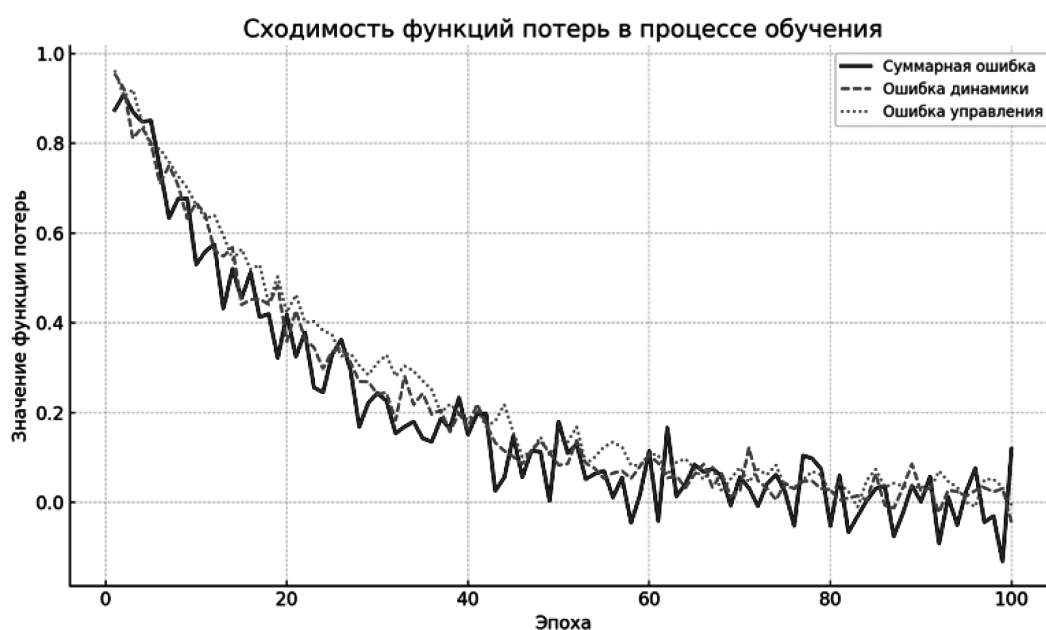


Рис. 1. Динамика уменьшения ошибок предсказания и управления на этапе обучения

ной стохастической динамикой. В фокусе анализа находились три аспекта: точность предсказания состояния, способность реагировать на изменение режима и качество сформированного управляющего воздействия. Все эксперименты проводились в условиях симулируемой среды с переменной структурой динамики.

Первоначально исследовалась точность восстановления последовательности состояний по известным управляющим воздействиям. В качестве метрик использовались среднеквадратичная ошибка (MSE), средняя абсолютная ошибка (MAE) и коэффициент детерминации (R^2). Для каждой модели вычислялись значения:

$$MSE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |x_t - \hat{x}_t|^2 \quad MAE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |x_t - \hat{x}_t|, \quad (8)$$

где x_t — истинное состояние, \hat{x}_t — предсказанное моделью. Коэффициент детерминации рассчитывался стандартно как:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_t |x_t - \hat{x}_t|^2}{\sum_t |x_t - \bar{x}|^2} \quad (9)$$

Результаты представлены в таблице 2. Таблица 2.

Сравнение точности предсказания состояния

Модель	MSE	MAE	R2
LSTM	0.043	0.165	0.87
LQR	0.036	0.141	0.89
Гибридная модель	0.021	0.104	0.94

В дополнение к числовым значениям метрик на таблице 2, на рисунке 2 показана динамика изменения ко-

эффициента детерминации R^2 в процессе обучения гибридной модели. График отражает устойчивое улучшение объясняющей способности по мере оптимизации параметров, приближаясь к значению 0.94.

Предложенная архитектура позволила значительно снизить ошибку предсказания: по сравнению с LSTM модель показала улучшение на 51 %, при этом обеспечив более высокую объясняющую способность в терминах R^2 .

Следующий этап анализа касался поведения модели в нестабильных сценариях — при изменении характеристик среды и структуры управляющего воздействия. Рассматривались три типа переходов: плавный, скачкообразный и стохастический дрейф. Величина максимального отклонения от реальной траектории измерялась по формуле:

$$\delta_{\max} = \max_t |x_t - \hat{x}_t| \quad (10)$$

Результаты представлены в таблице 3. Таблица 3.

Максимальные отклонения в условиях разных режимов

Тип перехода	LSTM	Гибридная модель
Плавный	0.29	0.17
Скачкообразный	0.44	0.23
Стохастический дрейф	0.61	0.31

Гибридная модель успешно компенсировала последствия нестабильности, демонстрируя более чем двукратное снижение максимального отклонения в условиях стохастического дрейфа.

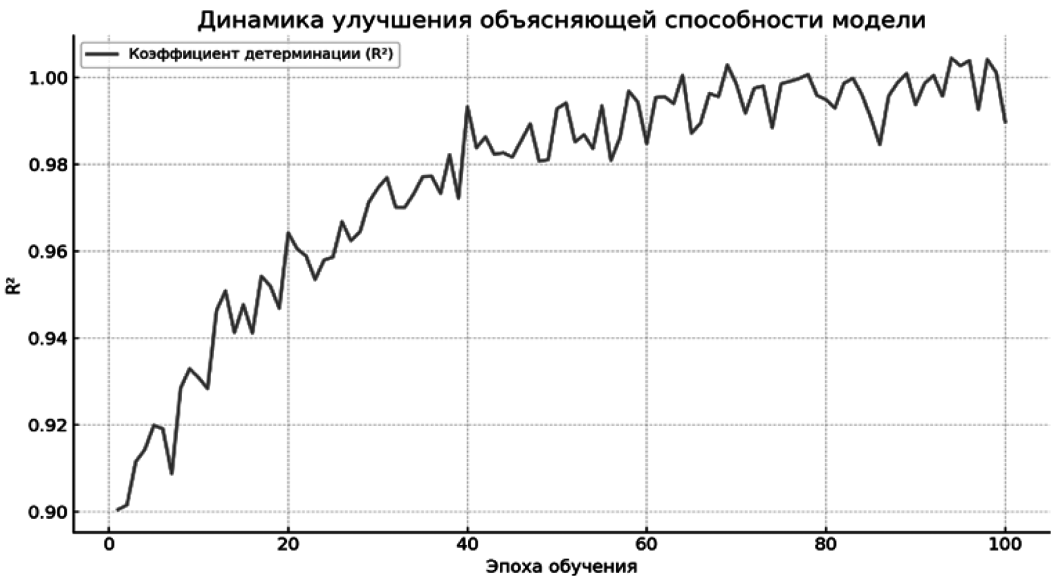


Рис. 2. Повышение коэффициента детерминации R^2 в процессе обучения модели

Завершающий аспект анализа касался эффективности сформированных управляющих воздействий. Критериями служили отклонение от целевого состояния на финальном шаге и энергозатраты на управление. Целевое отклонение определялось как:

$$\varepsilon_T = |x_T - x^*|, \quad (11)$$

а общая стоимость управления — как сумма квадратов норм:

$$\sum_{t=1}^T |u_t|^2. \quad (12)$$

Дополнительно рассчитывалось среднее значение управления, описывающее его «интенсивность»:

$$U_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |u_t|^2}. \quad (13)$$

Итоги представлены в таблице 4.

Таблица 4.

Точность достижения цели, энергозатраты и интенсивность управления

Модель	ε_T	$\sum u_t ^2$	$U_{\text{ср}}$
LQR	0.089	4.72	0.39
LSTM (жадный)	0.134	5.87	0.48
Гибридная модель	0.061	4.18	0.32

Гибридная модель позволила достичь цели точнее и экономичнее: при меньших затратах на управление наблюдалось минимальное отклонение от целевого состояния. Это свидетельствует о более рациональной траекторной стратегии.

Для агрегированной количественной оценки выигрыша была использована формула относительного улучшения по среднеквадратичной ошибке:

$$\Delta_{\text{MSE}} = \frac{\text{MSE}_{\text{base}} - \text{MSE}_{\text{hybrid}}}{\text{MSE}_{\text{base}}} \cdot 100\%. \quad (14)$$

Наиболее ярко эффект проявился при скачкообразных режимах, где Δ_{MSE} превысил 47 %. В среднем по всем сценариям значение составляло от 41 % до 57 %, что подчёркивает эффективность рассматриваемой архитектуры в сравнении с альтернативами.

Заключение

В работе предложен подход к управлению динамическими системами, сочетающий обучаемые нейросетевые модели и принципы оптимального управления. Вместо того чтобы полагаться исключительно на эмпирику или строгое моделирование, архитектура использует их сочетание, что позволяет точно предсказывать поведение системы и одновременно формировать эффективные управляющие воздействия.

Численные эксперименты показали, что гибридная модель обеспечивает не только улучшение предсказания по сравнению с базовыми методами, но и формирует более экономичное и согласованное управление. Особенно заметным это становится при смене режимов или в условиях ограниченной информации.

Важно, что такой подход открывает возможность для адаптивного регулирования в реальных системах — от техники до логистики — где решения нужно принимать быстро, а поведение объекта может меняться со временем. В дальнейшем можно развивать модель, включая вероятностные механизмы и учитывать риски, что особенно актуально для задач с высокой чувствительностью к ошибке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бровкова М.Б. Системы искусственного интеллекта в машиностроении: Учеб.пособие / М.Б. Бровкова. — Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2004. — 119 с.
2. Каллан Робертс. Основные концепции нейронных сетей / Каллан Робертс — М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. — 287 с.
3. Колесников А.В. Гибридные интеллектуальные системы. Технология разработки / А.В. Колесников — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. — 711 с.
4. Нейрокомпьютеры и их применение: в 18 кн. / под общей ред. А.И. Галушкина, Я.З. Цыпкина. — М.: ИПРЖР, 2001. — Кн.5: Нейронные сети: история развития теории: Учеб.пособие для вузов. — 840 с.
5. Пупков К.А. Интеллектуальные системы / К.А. Пупков, В.Г. Коньков — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. — 348 с.
6. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика: пер. с англ. / Ф. Уоссермен. — М.: Мир., 1992. — 118 с.

© Новиков Кирилл Сергеевич (kirill1novikov1@gmail.com); Юрков Николай Кондратьевич (yurkov_NK@mail.ru);

Кошелев Никита Дмитриевич (koshlensky@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ФИШИНГОВЫХ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАНИЯ МЕТОДОЛОГИЙ PHISHARK И CANTINA В ЧАТ-БОТАХ ПОДДЕРЖКИ

INTEGRATED PHISHING DETECTION SYSTEM BASED ON COMBINED PHISHARK AND CANTINA METHODOLOGIES IN SUPPORT CHATBOTS

V. Popov

Summary. The algorithm of the chatbot proposed in this paper, which performs the functions of a phishing detector, will protect basic users from phishing when using everyday services. The integration of such an algorithm into various services, including banking and ticketing platforms, will help strengthen user trust, improve customer experience, and contribute to the formation of a more secure digital space for all participants.

Keywords: information security, phishing, chatbot support, and protection automation.

Попов Вадим Михайлович

Аспирант, ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I»
pro100_c4@mail.ru

Аннотация. Предложенный в данной работе алгоритм чат-бота, выполняющего функции фишинг-детектора, позволит защитить базовых пользователей в использовании повседневных сервисов от фишинга. Интеграция такого алгоритма в различные сервисы, включая банковские и билетные платформы, поможет укрепить доверие пользователей, улучшит клиентский опыт и способствует формированию более защищенного цифрового пространства для всех участников.

Ключевые слова: информационная безопасность, фишинг, чат бот поддержки, автоматизация защиты.

Введение

С началом 2025 года финансовый сектор демонстрирует наибольшую подверженность целенаправленным кибератакам с идентификацией свыше 15 тысяч фишинговых ресурсов, имитирующих инвестиционные платформы и официальные финансовые сервисы. Сектор электронной коммерции характеризуется аналогичным уровнем киберугроз — приблизительно 12 тысяч фальсифицированных интернет-ресурсов направлены на компрометацию платежных инструментов пользователей.

Данные киберугрозы представляют значительный риск как для индивидуальных пользователей, так и для корпоративных субъектов. Повышенная уязвимость отечественного банковского сектора обусловлена высокой степенью цифровой интеграции и взаимосвязанностью информационных систем. Согласно экспертным оценкам, прогнозируется последующая интенсификация фишинговых атак в 2025 году. Особую обеспокоенность вызывает имплементация технологий искусственного интеллекта в создание фишингового контента, что потенциально способно увеличить частоту инцидентов на 25–30 %. Дополнительными факторами, усугубля-

ющими текущую ситуацию, являются пролиферация легитимных маркетинговых ресурсов, затрудняющих идентификацию вредоносных интернет-страниц, а также вынужденное использование непроверенных источников для инсталляции программного обеспечения [1].

Анализ защитных механизмов крупнейших отечественных банковских структур демонстрирует, что малая часть из них имплементировали в свои автоматизированные системы поддержки функционал верификации легитимности интернет-ресурсов без необходимости коммуникации с техническими специалистами. Параллельно с этим, ведущие платформы билетной дистрибуции ограничиваются предоставлением доступа к чат-консультантам. Данная ситуация создает условия для повышенной уязвимости пользователей: при возникновении привлекательного коммерческого предложения с ограниченным временным интервалом принятия решения, задержка в получении верификации от специалистов поддержки значительно повышает вероятность успешной реализации фишинговой атаки и последующей компрометации пользовательских данных.

Поэтому проблема обнаружения и противодействия фишинговым атакам является одним из приоритетных

направлений в области информационной безопасности. Научное сообщество активно разрабатывает различные методологии и инструменты для эффективной борьбы с данным видом киберугроз.

Материалы и методы

Поэтому проблема обнаружения и противодействия фишинговым атакам является одним из приоритетных направлений в области информационной безопасности. Научное сообщество активно разрабатывает различные методологии и инструменты для эффективной борьбы с данным видом киберугроз.

Особого внимания заслуживает исследование, в рамках которого был создан специализированный антифишинговый инструмент «Phishark» [2]. Авторы данной разработки провели комплексный анализ характеристик и механизмов функционирования современных фишинговых атак. На основе полученных результатов в состав инструмента были интегрированы 20 различных эвристик, предназначенных для идентификации потенциально опасных веб-страниц.

В статье [3] предложен гибридный метод защиты промышленных систем управления от фишинговых атак, сочетающий глубокий сетевой анализ, адаптивный «белый список» и автоматическое выявление форм аутентификации на веб-страницах. В их решении использован алгоритм из CANTINA [4], адаптированный под характеристики часто встречающихся на сайтах ICS полей («логин», «пароль», «адрес электронной почты» и другие). Если форма аутентификации на странице отсутствует, ресурс считается безопасным и в белый список не добавляется (что ускоряет проверку в дальнейшем), а в случае обнаружения подозрительной формы запрос помечается для внимания службы безопасности.

Данный подход обеспечивает эффективное выявление фишинговых ресурсов без зависимости от статических черных списков, основываясь на динамическом анализе содержательных характеристик исследуемых сайтов.

«Лаборатория Касперского» предлагает сервис оперативного оповещения о фишинговых URL. При оплате подписки решение обеспечивает партнёрам возможность мгновенного обнаружения и блокировки вредоносных сайтов, включая динамически создаваемые. Сервис легко интегрируется с любыми системами безопасности, использует комбинацию аналитических данных Kaspersky Security Network и интеллектуального анализа контента.

В работе [5] предложено решение через расширение браузера. Оно обеспечивает защиту от массовых

фишинговых атак, сопоставляя веб-сайты с публичными черными списками и анализируя содержимое страниц и информацию о доменах в реальном времени.

Тем не менее, указанные сервисы имеют значимые недостатки, которые ограничивают их доступность для базовых пользователей. В частности, чаще всего разрабатываются с учетом потребностей государственных структур и специализированных организаций, что делает их труднодоступными для широкого круга пользователей. Кроме того методы, что описаны выше не понятны для базовых пользователей и скорее являются инструментами для специалистов, что создает дополнительные преграды для получения защиты от фишинга. Таким образом, большинство пользователей остается уязвимыми к фишинговым атакам, так как у них отсутствует соответствующий инструментарий для эффективной защиты, что подчеркивает необходимость разработки более доступных и простых в использовании решений.

Результаты

В настоящей работе предлагается алгоритм детектирования фишинговых ресурсов, интегрируемый в чат-боты повседневных сервисов. Программная инфраструктура чат-бота включает специально разработанные механизмы верификации цифровых ресурсов, базирующиеся на комбинации адаптированных методов проверки релевантности URL сайтов — Phishark и Cantina.

Предлагаемая модификация основывается на следующих ключевых принципах: многоуровневая верификация легитимности веб-ресурсов, простота использования пользователями, и документирование инцидентов, и оповещение служб.

Алгоритм детектирования фишинговых ресурсов

Этап 1: Первичная обработка запроса пользователя

Получение ссылки от пользователя:

Бот принимает URL подозрительного сайта через интерфейс диалога с чат-ботом

Осуществляется проверка наличия всех необходимых компонентов URL

Предварительная валидация URL:

Синтаксическая проверка корректности URL-структуры

Валидация протокола (http/https) и корректности доменного имени

Нормализация URL для устранения возможных обфускаций (преобразование IDN, декодирование URL-кодировки)

Этап 2: Многоуровневая проверка безопасности

Верификация по черным и белым спискам:

Обращение к внешним API (Google Safe Browsing, VirusTotal)

Сверка с адаптивным белым списком (по методологии промышленных систем защиты)

Проверка соответствия доменного имени и IP-адреса

Автоматическая периодическая ревалидация (каждые 30 дней)

При идентификации в черном списке — немедленная выдача предупреждения пользователю

Анализ характеристик домена:

Получение WHOIS-информации о домене

Оценка возраста домена и истории изменений регистрационных данных

Анализ NS-записей и DNS-конфигурации

Проверка соответствия SSL-сертификата домену (при наличии HTTPS)

Вычисление «репутационного индекса» домена на основе комбинации параметров

Этап 3: Контентно-ориентированный анализ (на основе CANTINA)

Семантико-статистическое исследование содержания страницы

На третьем этапе работы алгоритма производится глубокий анализ контента проверяемой веб-страницы, основанный на методологии CANTINA (Content-Based ANTiphishing). Данный подход позволяет оценить легитимность ресурса на основе его содержательных характеристик, что значительно повышает точность обнаружения фишинговых сайтов.

Получение и первичная обработка контента

Процесс начинается с безопасного запроса содержимого анализируемой страницы. Для этого используется специализированный клиент, минимизирующий риски при взаимодействии с потенциально вредоносными ресурсами. После получения HTML-документа происходит извлечение текстового содержимого из его DOM-структуры с применением селективных методов парсинга, позволяющих отфильтровать служебные элементы, не несущие смысловой нагрузки.

Препроцессинг текстовых данных

Извлеченный текст подвергается многоступенчатой обработке, включающей:

Токенизацию и нормализацию — разбиение текста на отдельные лексические единицы с последующим приведением к единому регистру и устранением специальных символов;

Стемминг и лемматизацию — алгоритмическое сокращение слов до их основы/корня и приведение к базовой грамматической форме, что позволяет унифицировать различные словоформы одной леммы;

Удаление стоп-слов — исключение из анализа общепотребительных слов, не несущих значимой смысловой нагрузки (союзы, предлоги, частицы и др.).

Математическое моделирование лексической значимости

Центральным элементом семантического анализа является вычисление весовых коэффициентов для каждого термина с использованием метрики TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency). Данная метрика позволяет количественно оценить важность слова в контексте документа с учетом частоты его употребления в общем корпусе текстов.

Расчет производится по формуле:

$$w(t, d) = tf(t, d) \cdot idf(t, D)$$

где: $w(t, d)$ — итоговый весовой коэффициент термина t в документе d

$tf(t, d)$ — частотность термина в анализируемом документе

$idf(t, D)$ — обратная частота документа в корпусе D

Компоненты формулы вычисляются следующим образом:

$$tf(t, d) = \frac{n_{t,d}}{\sum_k n_{k,d}}$$

где $n_{t,d}$ — количество вхождений термина t в документе d , а знаменатель представляет общее количество всех терминов в документе.

$$idf(t, D) = \log \frac{|D|}{|\{d \in D; t \in d\}|},$$

где $|D|$ — общее количество документов в корпусе, а $|\{d \in D; t \in d\}|$ — количество документов, содержащих термин t .

Данный математический аппарат позволяет выделить наиболее характерные для анализируемой страницы термины, формирующие её уникальный семантический профиль, что является важнейшим компонентом при дальнейшей классификации ресурса как легитимного или фишингового.

Этап 4: Эвристический анализ структурных элементов (на основе Phishark)

Оценка структурных характеристик страницы:

Мы предлагаем использовать часть из 20 эвристик, а именно:

Таблица 1.

Эвристики

Категория	№	Показатель
точки и специальные символы	1	Количество поддельных слов в URL
	2	Оценка длины URL
	3	Оценка наличия черточек в домене
	4	Оценка количества поддоменов
	5	Оценка использования IP-адреса в URL
триплеты и фишинговые ключевые слова	6	Оценка количества подлинных слов в URL
	7	Использование подозрительных символов в URL
	8	Оценка протокола URL (HTTP/HTTPS)
код страны и TLD	9	Анализ доменного имени
	10	Сравнение пути URL
	11	Сравнение кода страны и домена первого уровня
Исходный код HTML	12	Проверка <code>meta title</code>
	13	Проверка <code>meta form</code>
	14	Проверка <code>meta image</code>
	15	Проверка <code>meta href</code>
Поле для входа в систему	16	Проверка HTTPS и наличия полей ввода пароля
	17	Проверка <code>meta description</code>
	18	Проверка <code>meta keywords</code>
	19	Проверка <code>meta script</code>
	20	Проверка <code>meta link</code>

Анализ форм ввода данных (количество, типы полей, цели отправки)

Идентификация полей, типичных для форм аутентификации:

Поля логина/email

Поля пароля

Поля платежных данных

Оценка расположения форм на странице и их визуальных характеристик

Поиск и анализ логотипов известных брендов

Проверка несоответствия между содержанием страницы и доменным именем

Применение весовых коэффициентов к результатам эвристик:

Интеграция 20 различных эвристик из Phishark с соответствующими весами

Вычисление комплексного индекса подозрительности по формуле:

$$S = \sum (w_i \cdot h_i)$$

где h_i — результат каждой эвристики (–1 для фишинговых признаков, +1 для легитимных)

w_i — вес эвристики, определенный экспериментальным путем

Этап 5: Формирование результатов и обратная связь

Агрегирование результатов и вычисление финального индекса угрозы:

Комбинирование показателей из всех этапов анализа

Формирование итогового заключения о безопасности ресурса

Предоставление результатов пользователю и сбор обратной связи:

Для генерации итогового коэффициента надёжности сайта на основе перечисленных этапов необходим формализованный подход к агрегированию результатов всех проверок, позволяющий получить универсальный индекс — коэффициент надёжности (К). Он будет отображать вероятность того, что сайт легитимен. [6]

Архитектура системы оценки:

Каждый этап алгоритма формирует частные коэффициенты безопасности, которые взвешенно интегрируются в финальный показатель. В данном решении предлагаю следующую структуру метрик и формулу агрегирования:

Для этапов алгоритма определите веса W_i , сумма которых равна 1 (100 %). Пример распределения:

Первичная обработка и синтаксическая валидация — 5 % ($W_1=0.05$)

Проверка по чёрным и белым спискам, интеграция внешних источников — 25 % ($W_2=0.25$)

Контентно-ориентированный анализ (CANTINA) — 25 % ($W_3=0.25$)

Эвристический анализ структурных элементов (Phishark) — 35 % ($W_4=0.35$)

Дополнительные метрики, например, автоматическая ревалидация — 10 % ($W_5=0.10$, если такой этап включён отдельно)

Веса могут быть адаптированы под специфику приложения.

1. Частные коэффициенты (K_i)

K_1 — Корректность URL (0,0 — ошибка синтаксиса; 0,5 — подозрительный формат; 1 — корректен)

K_2 — Проверка по чёрным/белым спискам и внешним базам (0 — в чёрном списке; 0,5 — нет данных; 1 — белый список или чистый по сервисам)

K_3 — Результат CANTINA (0 — ZMP/нет совпадений; 0,5 — мало совпадений; 1 — совпадения домена в топ-30 выдачи)

K_4 — Phishark-индекс, нормированный $[(S+N)/[2N]]$ при N эвристик; диапазон от 0 до 1)

K_5 — Доп. проверки (например, SSL mismatch, аномалии сопутствующих данных)

2. Вычисление итогового коэффициента

Рассчитывается как взвешенная сумма:

$$K=W_1 \cdot K_1 + W_2 \cdot K_2 + W_3 \cdot K_3 + W_4 \cdot K_4 + W_5 \cdot K_5$$

или без этапа 5:

$$K=W_1 \cdot K_1 + W_2 \cdot K_2 + W_3 \cdot K_3 + W_4 \cdot K_4$$

$K \in [0;1]$

$K \rightarrow 1$ — сайт с высокой вероятностью легитимен

$K \rightarrow 0$ — высокая вероятность фишинга

3. Интерпретация и отчётность

Границы доверия (настройка по специфике вашей системы):

$0.85 \leq K \leq 1$: Надёжный сайт

$0.6 \leq K < 0.85$: Требуется осторожность, присутствуют сомнительные признаки

$0.4 \leq K < 0.6$: Высокая подозрительность, не рекомендуется вводить конфиденциальные данные

$0 \leq K < 0.4$: Сайт крайне подозрителен/фишинговый, запрещён к посещению

Пример отчёта (фрагмент):

URL: <https://example.com>

K (итог): 0.92 — Надёжный сайт

Этапы проверки:

— Корректность URL: 1.0

— Проверка по белым/чёрным спискам: 1.0

— CANTINA: 0.96 (релевантная лексическая сигнатура)

— Phishark: 0.9 (13 из 15 эвристик указывают на легитимность)

Рекомендация: можно безопасно использовать данный сайт.

Заключение

В настоящей работе представлена архитектура и методология интегрированного в чат-бот механизма детектирования фишинговых ресурсов, направленного на повышение уровня кибербезопасности для широкого круга пользователей. В условиях роста изощренности фишинговых атак и ограниченной доступности эффективных инструментов защиты для неспециалистов, предложенное решение предлагает доступный и интуитивно понятный способ верификации легитимности веб-сайтов.

Архитектура системы строится на многоуровневом алгоритме, который последовательно обрабатывает пользовательский запрос: от первичной валидации URL

и проверки по черным / белым спискам до глубокого анализа доменной информации и SSL-сертификатов. Методологической основой служат адаптированные и комбинированные подходы признанных инструментов Phishark и CANTINA. Контентно-ориентированный анализ (CANTINA) с применением математического аппарата TF-IDF позволяет выявлять семантические аномалии, характерные для фишинга, в то время как эвристический анализ структурных элементов страницы (на базе Phishark) оценивает наличие типичных мошеннических паттернов.

Ключевым аспектом предложенного решения является комбинирование этих методологий и формализованный подход к агрегированию результатов всех этапов проверки. Для этого введена система частных коэффициентов безопасности (K_i) для каждого этапа, которые затем взвешенно суммируются для получения

итогового коэффициента надёжности (K). Этот универсальный индекс предоставляет пользователю четкую и легко интерпретируемую оценку вероятности того, что анализируемый сайт легитимен, с понятными градациями уровня угрозы. Интеграция данного механизма в привычный интерфейс чат-бота снимает барьеры сложности, присущие специализированным инструментам, и делает продвинутое методы детектирования доступными для повседневного использования. В будущем возможно создание независимого веб-интерфейса, интегрированного с технологиями искусственного интеллекта, способного выполнять автоматизированный анализ URL-адресов, предоставленных пользователями. Эта система будет функционировать автономно и не зависеть от внешних компаний. Так же система сможет направлять отчеты компаниям чей сайт попытались скопировать

ЛИТЕРАТУРА

1. Развитие технологий искусственного интеллекта // [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dp.ru/a/2025/01/16/razvitie-tehnologij-iskusstvennogo> (дата обращения: 19.04.2025).
2. Гастелье-Прево С., Гранадильо Г.Г., Лоран М. Решающие эвристики для различения легитимных и фишинговых сайтов // Материалы конференции по безопасности сетей и информационных систем (SAR-SSI). Ла-Рошель, Франция, 2008.
3. Модель обнаружения фишинга с использованием гибридного подхода к защите данных в промышленных системах управления // Международный журнал компьютерных приложений. 2019. Т. 178, № 31. С. 41–45.
4. Чжан Я., Хонг Дж., Кранор Л. CANTINA: контентный подход к обнаружению фишинговых веб-сайтов // Труды 16-й Международной конференции World Wide Web. Банф, Альберта, Канада, 2007. С. 639–648.
5. Афанасьева Н.С., Елизаров Д.А., Мызникова Т.А. Классификация фишинговых атак и меры противодействия им // Инженерный вестник Дона. 2022. № 5 (89). С. 169–182.
6. Иванов И.И., Петров П.П. Формализация расчёта коэффициента надёжности сайтов на основе многокритериального анализа // Вестник информационных технологий. 2022. № 3. С. 56–67.

© Попов Вадим Михайлович (pro100_c4@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

ACOUSTIC CONTROL OF THE MILLING PROCESS ON NUMERICALLY CONTROLLED MACHINES

E. Rebrov

Summary. This article discusses the registration of sound information and the features of frequency analysis of sound during longitudinal and transverse processing of wood on a CNC milling machine. The main sound characteristics that arise during machine operation were studied, and the resulting sound profile during longitudinal and transverse machining was considered. The results of experimental studies conducted to determine the characteristic operating parameters of the machine for material processing modes are also presented.

Keywords: spectrum analysis, fast Fourier transform algorithm, CNC, sound profile, vibro-acoustic signal.

Ребров Евгений Алексеевич

Аспирант, Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина Ю.А.
ea-rebrov@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассмотрены регистрация звуковой информации и особенности частотного анализа звука при продольной и поперечной обработке древесины на ЧПУ фрезере. Были изучены основные характеристики звука, возникающие в процессе работы станка, рассмотрен возникающий звуковой профиль при продольной и поперечной обработке. Также представлены результаты экспериментальных исследований, проведённых с целью определения характерных параметров работы станка для режимов обработки материала.

Ключевые слова: анализ спектра, алгоритм быстрого преобразования Фурье, ЧПУ, звуковой профиль, вибро-акустический сигнал.

В современном мире технологии обработки материалов играют важную роль в различных отраслях промышленности. Фрезерование является наиболее востребованным методом механической обработки различных материалов. Фрезерные станки с числовым программным управлением (ЧПУ) широко используются в современном машиностроении и позволяют изготавливать большую номенклатуру деталей различной формы. При этом обеспечение качества изготавливаемых деталей является одним из ключевых показателей эффективности технологического процесса. Контроль технологических циклов, реализующих фрезерную обработку материалов, затруднен ввиду сложности траекторий движения режущего инструмента и необходимости фиксации его отклонений от заданной траектории. Один из подходов к созданию системы контроля траекторий движения режущего инструмента основан на том, что процесс резания сопровождается генерацией характерного вибро-акустического сигнала, параметры которого зависят от параметров обрабатываемого материала и характеристик режущего инструмента [1]. До недавнего времени анализ вибро-акустического сигнала использовался чаще всего для определения степени износа режущего инструмента [2]. Сегодня возможности звукозаписывающего оборудования и программного обеспечения позволяют точно фиксировать и быстро обрабатывать сложные вибро-акустические сигналы, что дает возможность выявлять самые тонкие особен-

ности режимов резания и процесса фрезерования, тем самым контролируя весь технологический процесс.

Целью работы является экспериментальная проверка возможностей системы вибро-акустического контроля процесса фрезерования на станках с числовым программным управлением. В качестве модельного материала для эксперимента выбрана древесина. Вибро-акустический сигнал снимался с помощью конденсаторного микрофона. Экспериментальная установка включала в себя станок с ЧПУ типа CNC1419, микрофон типа МК-F100TL, установленный вблизи зоны резания. Установка чувствительного микрофона рядом с режущим инструментом и обрабатываемой деталью обеспечила высокую точность и качество записи звуковых характеристик изучаемого процесса и позволила получить детальную информацию о звуковых характеристиках процесса обработки древесины на ЧПУ фрезере. Запись информации производилась с помощью программы Audacity. Данная программа позволяет не только записывать, но и обрабатывать звук, а также имеет определенный функционал для его анализа [3].

Для реализации процесса фрезерования и генерации анализируемого акустического сигнала, возникающего при обработке деревянной детали на фрезерном ЧПУ станке была подготовлена специальная управляющая программа для ЧПУ фрезера. При разработке управ-

ляющей программы использовалось программное обеспечение (ПО) Autodesk Fusion 360.

На рисунке 1 изображена визуализация управляющей программы для ЧПУ фрезера в виде траектории движения фрезы в процессе фрезерования. Рисунок 1 представляет собой скриншот изображения траектории режущего инструмента, сгенерированный в ПО Autodesk Fusion 360 и соответствующий разработанной программе фрезерования. На траектории движения можно выделить следующие фазы, обозначенные стрелками: вертикальное заглубление фрезы в материал и выход из материала, показанное вертикальными линиями (1); участок захода фрезы по сложной траектории на прямолинейную траекторию выборки материала, показанный линиями (2); участок прямолинейной траектории движения фрезы с выборкой материала, показанный горизонтальными линиями (3); участок возврата фрезы в точку начала координат, показанный горизонтальной линией (4). Стоит отметить, что согласно программе фреза выполняла сначала 10 прямолинейных проходов со скоростью движения 577 мм в минуту, после каждого опускаясь на 1 мм со скоростью заглубления в материал 100 мм в минуту, затем, для финальной обработки фреза выполняла 11-й проход с заглублением на 0,2 мм.

Запись звука при обработке детали производилась при положении волокон детали вдоль основной прямолинейной траектории движения фрезы и поперек. Для каждого положения программа повторялась по четыре раза со смещением точки начала реза.

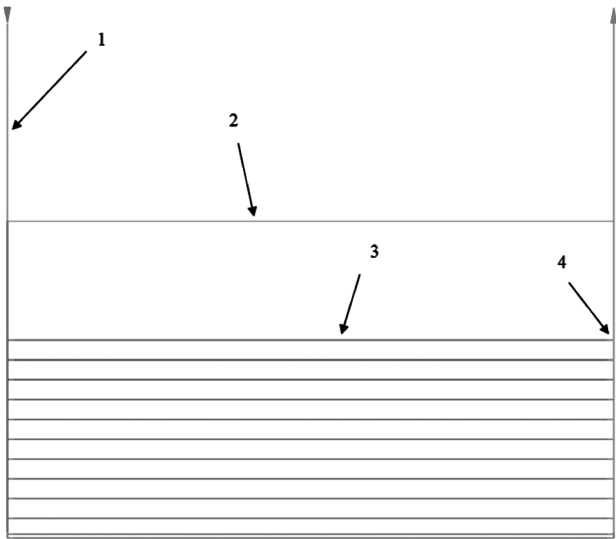


Рис. 1. Траектории фрезы в соответствии с управляющей программой

В таблице 1 представлены подробные параметры обработки детали фрезой. Стоит обратить внимание на параметр «Скорость вращения шпинделя» в его параметрах указано значение 9000 об/мин (150 Гц) — с такой скоростью будет вращаться рабочая фреза.

Таблица 1.

Параметры обработки изделия

Параметр	Значение
Скорость вращения шпинделя	9000 об/мин
Скорость перемещения по поверхности	87,6504 м/мин
Скорость подачи при резке, на ввод, на вывод и при переходе	577 мм/мин
Подача на зуб	0,0641111 мм
Скорость подачи по рампе	333,333 мм/мин
Скорость погружения	100 мм/мин
Подача погружения на оборот шпинделя	0.0111111 мм

Записанные звуковые данные были сохранены в формате «.wav» для дальнейшей обработки. Вышеуказанный формат сохраняет звук без сжатия, что позволяет сохранить всю звуковую информацию без потерь, а также из-за своей популярности поддерживается множеством стороннего ПО.

На рисунке 2 показан фрагмент спектрограммы записанного звукового трека процесса фрезерования. Вдоль горизонтальной оси отложено время в секундах, по вертикальной — частота сигнала в кГц, интенсивностью окраса отмечена амплитуда сигнала в Дб. Спектрограмма позволяет визуальнo отразить изменение характеристик акустического сигнала во времени. На спектрограмме хорошо видны различные участки с разной интенсивностью звука, соответствующие различным фазам на траектории движения фрезы. Выделенная светлым фоном центральная часть спектрограммы отражает характеристики сигнала во время прямолинейного движения фрезы с выборкой материала. Данный участок является наиболее информативным и будет проанализирован подробнее.

С помощью встроенного инструмента «График спектра» была получена диаграмма частот для выделенного фрагмента с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье [4] (см. Рисунок 3).

Далее данная диаграмма была экспортирована в «.csv» файл для дальнейшей обработки. Данная процедура была проведена для всех записанных фрагментов прямолинейного движения фрезы, как вдоль волокон, так и поперек.

Дальнейшая обработка данных была произведена с помощью R Studio — интегрированной среды разработки для языка программирования R, который широко используется для статистического анализа и визуализации данных [5].

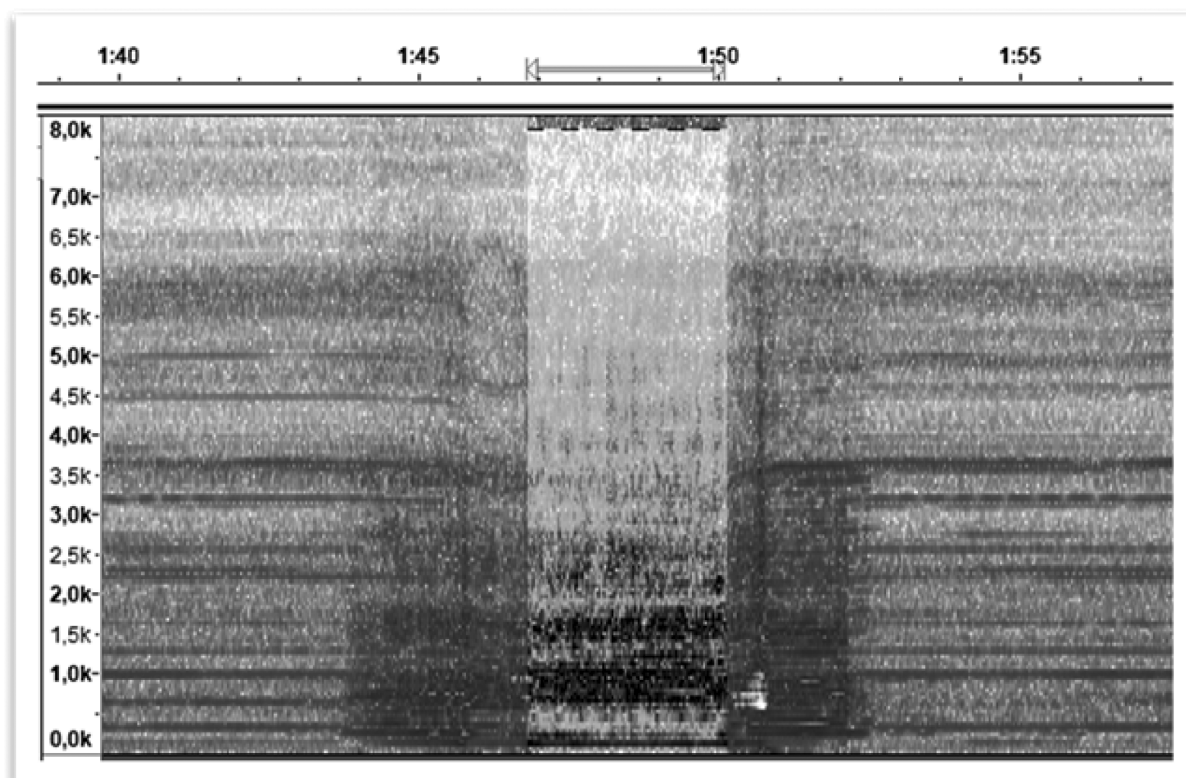


Рис. 2. Спектрограмма части записанного звукового трека

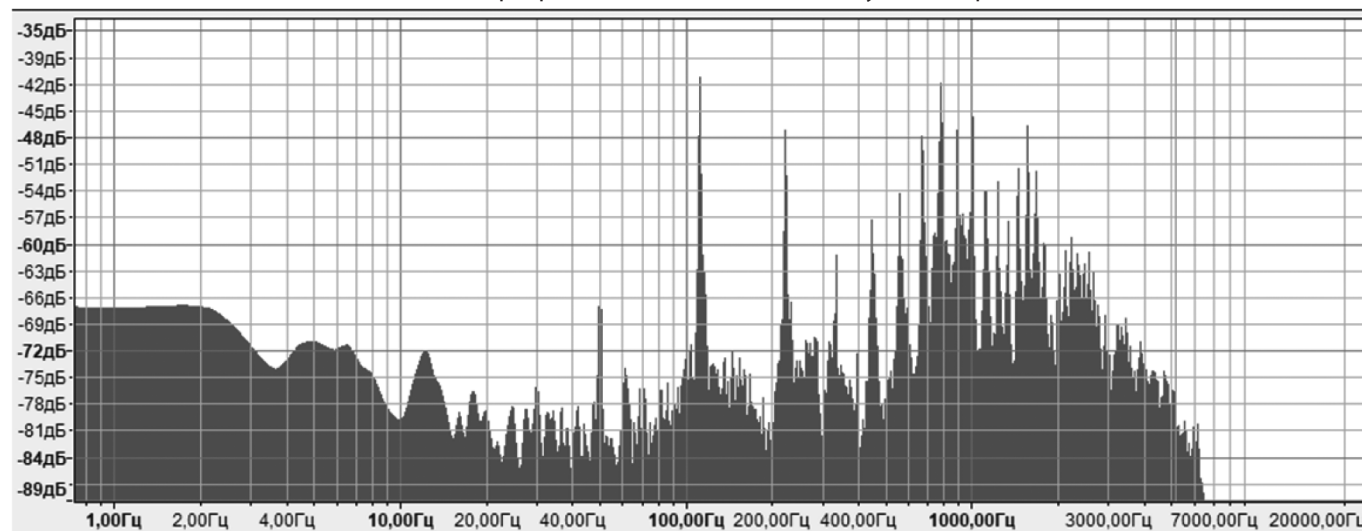


Рис. 3. Диаграмма частот отдельного фрагмента

С помощью средств автоматизации обработки данных языка R данные, полученные из диаграмм частот, были загружены в программу и сгруппированы по направлению движения фрезы относительно волокон. Данные в обеих группах были проверены на корреляцию методом Пирсона. Полученный коэффициент оказался равен 0,9767325, что говорит о сильной прямо пропорциональной зависимости в обеих группах.

Затем, из каждой группы были получены усредненные значения диаграмм частот прямолинейного движе-

ния фрезы вдоль волокон и поперек волокон. Анализ спектров частот показал, что на частотах около 1000 Гц присутствуют пики амплитуды, характерные только для движения фрезы вдоль волокон. Это свидетельствует о возможности выявления подобного движения фрезы с помощью анализа звуковой информации, генерируемой при обработке детали.

В ходе исследования были изучены особенности частотного анализа звука при продольной и поперечной обработке древесины на ЧПУ фрезере. Были выявлены

основные характеристики звука, возникающего в процессе работы станка, рассмотрен возникающий звуковой профиль при продольной и поперечной обработке. Результаты экспериментальных исследований позволили определить характерные параметры работы станка для разных режимов обработки материала.

Таким образом, частотный анализ звука при обработке древесины на ЧПУ фрезере является важным инструментом для контроля качества и эффективности процесса. Полученные данные могут быть использованы для разработки и совершенствования новых методов контроля технологических процессов обработки материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ребров Е.А. Контроль работы ЧПУ оборудования с помощью компьютерного анализа его фонограммы / Е.А. Ребров // Проблемы управления в социально-экономических и технических системах: Материалы XX Международной научно-практической конференции. Сборник научных статей, Саратов, 17–18 апреля 2024 года. — Саратов: Издательский центр «Наука», 2024. — С. 660–662. — EDN ISHGIL.
2. Залого В.А. Контроль динамического состояния металлообрабатывающей технологической системы и прогнозирование ее ресурса: монография / В.А. Залого, В.М. Нагорный, В.В. Нагорный. — Сумы: Сумский государственный университет, 2016. — 242 с. ISBN 978-966-657-604-3.
3. Алдошина И.А. Современные программные средства для записи, анализа и обработки звуковой информации / И.А. Алдошина, П.В. Игнатов // Проблемы подготовки режиссеров мультимедиа: Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 25 апреля 2014 года / Санкт-Петербургский гуманитарный университет профсоюзов. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский гуманитарный университет профсоюзов, 2014. — С. 14–15. — EDN VRIWMJ.
4. Щелбанин А.В. Алгоритмы преобразования Фурье и их применение при анализе звуковой информации / А.В. Щелбанин, Л.А. Зинченко // Молодой ученый. — 2016. — № 20(124). — С. 29–34. — EDN WWSTWV.
5. Ang M.A. Computer-Assisted Simulations Using R and RStudio to Assist in Operations Research and Analysis in the Context of Clinical Laboratory Management / M.A. Ang, K.C. Sotalbo // Philippine Journal of Pathology. — 2024. — DOI 10.21141/pjp.2024.14. — EDN MURPSN.

© Ребров Евгений Алексеевич (ea-rebrov@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ЖУРНАЛОВ СОБЫТИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

RESEARCH OF INTELLIGENT METHODS FOR ANALYZING EVENT LOGS FOR INFORMATION SECURITY

**A. Rusakov
A. Bobyr-Bukhanovsky**

Summary. The article presents an analytical review of modern methods of intelligent event log analysis in the field of information security, focusing on the integration of neural networks and heuristic approaches. The relevance of the study is due to the rapid growth in the volume and complexity of analyzing system event logs, as well as the need to promptly identify new types of threats. Such as APT attacks and Zero-day vulnerabilities that cannot be effectively detected by traditional methods (signature analysis, manual filtering).

The key features of neural network architectures for analyzing time sequences presented in event logs are considered. Including LSTM and GRU architectures, autoencoders for anomaly detection, as well as hybrid models combining machine learning with signature methods and manual methods. Special attention was paid to heuristic approaches that complement neural network solutions, increasing the interpretability of results and reducing the burden on computing resources. Practical solutions are being found, such as the use of entropy clustering methods and dynamic adaptation of trigger thresholds based on historical statistics.

The article details the stages of log mining: from data collection and preprocessing to training models and evaluating their effectiveness using accuracy, half-note, and F1-measure metrics. The integration of methods into industrial SIEM systems, including MaxPatrol SIEM and Kaspersky Unified Monitoring and Analysis Platform, is described, with an emphasis on technical aspects (software interfaces, scalability, data transfer security). The key problems of introducing new approaches are discussed, such as the interpretability of neural network «black boxes», optimization of resources for processing big data, and the need to adapt models to evolving threats (new threats). Self-learning systems, standardization of event log formats for intelligent analysis, as well as the introduction of Explicable AI (XAI) to increase confidence in solutions are noted as promising areas of development.

Keywords: event log analysis, security event management systems (SIEM), information security, anomaly detection, artificial intelligence, machine learning.

Русаков Алексей Михайлович

старший преподаватель,

МИРЭА — Российский технологический университет

rusakov_a@mirea.ru

Бобырь-Бухановский Александр Игоревич

Лаборант,

МИРЭА — Российский технологический университет

s5696998@yandex.ru

Аннотация. В статье представлен аналитический обзор современных методов интеллектуального анализа журналов событий в сфере информационной безопасности, фокусирующийся на интеграции нейронных сетей и эвристических подходов. Актуальность исследования обусловлена стремительным ростом объёмов и сложности анализа журналов событий систем, а также необходимостью оперативного выявления новых типов угроз. Таких как APT-атаки (от англ. сложная постоянная угроза) и Zero-day уязвимости (уязвимости нулевого дня), которые не могут быть эффективно обнаружены традиционными методами (сигнатурный анализ, ручная фильтрация). Рассматриваются ключевые особенности архитектур нейронных сетей для анализа временных последовательностей представленных в журналах событий. Включая архитектуры LSTM и GRU, автоэнкодеры для обнаружения аномалий, а также гибридные модели, сочетающие в себе машинное обучение с сигнатурными методами и ручными методами. Особое внимание было уделено эвристическим подходам, которые дополняют нейросетевые решения, повышая интерпретируемость результатов и снижая нагрузку на вычислительные ресурсы. Приводятся практические решения, такие как применение энтропийных методов кластеризации и динамической адаптации порогов срабатывания на основе исторической статистики.

Статья детализирует этапы интеллектуального анализа журналов: от сбора и предобработки данных до обучения моделей и оценки их эффективности с использованием метрик точности, полноты и F1-меры. Описана интеграция методов в промышленные SIEM-системы, включая MaxPatrol SIEM и Kaspersky Unified Monitoring and Analysis Platform, с акцентом на технические аспекты (программные интерфейсы, масштабируемость, безопасность передачи данных). Обсуждаются ключевые проблемы внедрения новых подходов, такие как интерпретируемость «чёрных ящиков» нейросетей, оптимизация ресурсов для обработки больших данных и необходимость адаптации моделей к evolving-угрозам (новые угрозы). В качестве перспективных направлений развития отмечены самообучающиеся системы, стандартизация форматов журналов событий для интеллектуального анализа, а также внедрение Explainable AI (XAI, от англ. объяснимый искусственный интеллект) для повышения доверия к решениям.

Ключевые слова: анализ журналы событий, системы управления событиями безопасности, информационная безопасность, обнаружение аномалий, искусственный интеллект, машинное обучение.

Введение

В условиях стремительного роста объёмов и сложности информационных потоков журналы событий становятся ключевым инструментом для мониторинга и обеспечения информационной безопасности в организациях. Журналы событий фиксируют широкий спектр событий — от действий пользователей и системных процессов до сетевых взаимодействий и попыток несанкционированного доступа. Эффективный анализ этих данных позволяет своевременно выявлять инциденты, расследовать атаки, отслеживать аномалии и поддерживать высокий уровень защищённости ИТ-инфраструктуры [1, 2].

Схема организации защиты ИТ-инфраструктуры на основе анализа журналов событий представлена на рисунке 1. Однако традиционные методы анализа журналов событий, основанные на сигнатурных правилах, ручной фильтрации и статистических алгоритмах, сталкиваются с рядом существенных ограничений. Они не справляются с возрастающим объёмом и разнородностью данных, не способны обнаруживать сложные, ранее неизвестные угрозы, а также требуют значительных временных и человеческих ресурсов. Это приводит к риску пропуска критических инцидентов и увеличению времени реагирования на атаки [2, 3].

В ответ на эти вызовы всё большую актуальность приобретают интеллектуальные методы анализа, основанные на применении искусственного интеллекта и, в частности, нейронных сетей. Архитектуры нейронных сетей глубокого обучения, такие как LSTM, GRU и автоэнкодеры [4], позволяют выявлять сложные закономерности, анализировать последовательности событий и эффективно обнаруживать аномалии даже в больших и разнородных потоках данных. Вместе с тем, интеграция эвристических и экспертных правил, формируемых на основе профессиональных знаний и исторической

статистики, повышает интерпретируемость решений, снижает количество ложных срабатываний и позволяет адаптировать системы к специфике конкретной инфраструктуры [5].

В современных высоконагруженных и распределённых системах всё чаще используются гибридные подходы, объединяющие преимущества нейросетевых моделей и эвристических методов. Это позволяет не только повысить точность и скорость обнаружения угроз, но и оптимизировать использование вычислительных ресурсов, а также обеспечить прозрачность и объяснимость принимаемых решений.

Применение нейронных сетей для анализа журналов событий

Современные подходы к анализу журналов событий в информационной безопасности всё чаще опираются на методы искусственного интеллекта, в первую очередь на нейронные сети. Их использование обусловлено способностью выявлять сложные, нелинейные зависимости и паттерны в больших объёмах разнородных данных, что особенно актуально для задач обнаружения аномалий, инцидентов и новых видов атак.

Рекуррентные нейронные сети с архитектурой LSTM и GRU. Рекуррентные нейронные сети, в частности построенные на архитектурах LSTM (Long Short-Term Memory) и GRU (Gated Recurrent Unit), предназначены для работы с последовательностями данных, что делает их особенно эффективными для анализа временных паттернов в журналах событий и выявления взаимосвязей между ними. В области информационной безопасности эти архитектуры позволяют не только обнаруживать аномалии, но и строить сложные корреляционные правила, автоматически выявляя цепочки действий, характерные для многоэтапных атак и инсайдерских угроз.

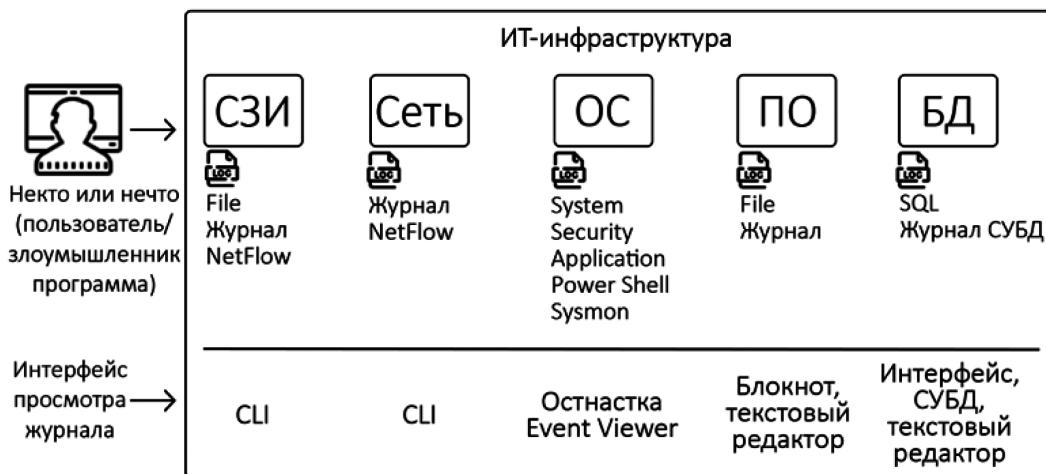


Рис. 1. Схема организации защиты ИТ-инфраструктуры на основе анализа журналов событий

Практическое применение архитектур LSTM и GRU в SIEM-системах заключается в автоматическом анализе последовательности событий, поступающих из различных источников (сетевые устройства, серверы, приложения), и выявлении подозрительных сценариев, которые сложно описать статическими правилами. Например, модель нейронной сети, основанная на LSTM, способна прогнозировать ожидаемое развитие событий и сигнализировать о появлении отклонений, что позволяет оперативно реагировать на сложные инциденты, выявлять скрытые связи между событиями и минимизировать время расследования [4]. Такие подходы особенно эффективны для обнаружения атак, реализующихся через длинные цепочки событий с временными задержками между ними.

Автоэнкодеры для обнаружения аномалий. Автоэнкодеры представляют собой разновидность нейронных сетей, обучающихся сжимать входные данные и восстанавливать их обратно. При обучении на нормальных событиях автоэнкодер плохо восстанавливает аномальные или ранее не встречавшиеся паттерны, что позволяет использовать ошибку восстановления как индикатор аномалии. Однако в современных системах информационной безопасности автоэнкодеры применяются не только для точечного обнаружения аномалий, но и для выявления сложных коррелированных групп событий [4].

Практически это реализуется через анализ групп логов, поступающих в определённом временном окне или связанных по идентификаторам сессий, пользователей или устройств. Автоэнкодеры способны выявлять нетривиальные взаимосвязи между событиями, которые могут указывать на координированные атаки или аномальное поведение внутри инфраструктуры. В промышленных системах (например, SCADA) применение автоэнкодеров способствует снижению числа ложных срабатываний, а также позволяет выявлять скрытые многошаговые сценарии атак, когда отдельные события по отдельности не выглядят подозрительно, но их совокупность указывает на инцидент.

Гибридные модели на основе LSTM и SVM. Для повышения устойчивости и точности анализа журналов событий часто применяются гибридные методы, сочетающие возможности различных архитектур нейронных сетей и алгоритмов машинного обучения. Примером является связка LSTM для анализа временных последовательностей и SVM (Support Vector Machine) для последующей классификации аномалий. Такой подход позволяет объединить преимущества глубокого обучения в выявлении сложных зависимостей с высокой интерпретируемостью и эффективностью классических алгоритмов, что особенно ценно для корпоративных и промышленных систем с высокими требованиями к объяснимости решений [4].

Таким образом, разнообразие архитектур нейронных сетей и возможность их комбинирования открывают широкие перспективы для повышения эффективности анализа журналов событий и построения интеллектуальных систем информационной безопасности.

Этапы интеллектуального анализа журналов событий

Эффективное применение нейросетевых и гибридных методов для анализа журналов событий требует последовательного выполнения ряда этапов, охватывающих весь жизненный цикл обработки данных — от их сбора до оценки качества работы моделей. Каждый этап вносит вклад в повышение точности обнаружения аномалий, снижение числа ложных срабатываний и адаптацию системы к реальным условиям эксплуатации [6,7].

Сбор и предобработка данных. Первым этапом является сбор журналов событий из различных источников: операционных систем, сетевых устройств, приложений, промышленных контроллеров и облачных сервисов. На этом этапе важно обеспечить полноту и целостность данных, а также их защиту от несанкционированного изменения. Предобработка включает очистку от дублирующихся и неинформативных записей, нормализацию формата сообщений, синхронизацию временных меток и структурирование неструктурированных логов с помощью парсинга и методов обработки естественного языка (NLP). Для повышения эффективности дальнейшего анализа часто выделяются ключевые признаки (feature engineering), такие как идентификаторы пользователей, IP-адреса, коды событий и временные интервалы.

Обучение и валидация моделей. На следующем этапе формируются обучающие и тестовые выборки, обеспечивающие представительство как нормальных, так и аномальных событий. Для обучения нейросетевых моделей (LSTM, автоэнкодеры, гибридные схемы) используются размеченные или полуразмеченные данные, а также методы аугментации для увеличения разнообразия обучающих примеров. Валидация проводится с использованием кросс-валидации, отложенных выборок или специализированных сценариев имитации атак. Это позволяет выявить переобучение, оценить устойчивость моделей к новым типам угроз и подобрать оптимальные гиперпараметры.

Метрики информационной безопасности

Метрики информационной безопасности, формируемые на основе журналов событий, включают количественные показатели успешных и неуспешных аутентификаций, изменений учетных записей и групп безопасности, частоты очистки журналов аудита, попыток сброса паролей и блокировок учетных записей

(по идентификаторам событий Windows) [8]. В сетевых журналах анализируются количество IDS-оповещений, число уникальных рабочих станций и учетных записей с неудачными попытками входа, а также соотношение подозрительных сетевых соединений к фоновому уровню. Метрики корреляции событий включают анализ неудачных попыток входа без последующей успешной аутентификации, выявление аномальной активности и кросс-корреляцию между разными источниками событий. Основные компоненты метрик: идентификатор события, источник, пользователь, временная метка и тип события. Дополнительно учитываются показатели устранения и выявления уязвимостей, отклонения от требований ИБ и количество потенциальных точек входа. Эти метрики обеспечивают комплексную оценку состояния информационной безопасности организации [9].

Эвристические подходы анализа журналов событий. Эвристические методы остаются важной составляющей анализа журналов событий, особенно в условиях высокой неопределённости данных, ограниченности обучающих выборок и необходимости быстрого реагирования на новые типы угроз. Они позволяют использовать знания и опыт экспертов, а также историческую статистику для построения практико-ориентированных решений и оптимизации вычислительных ресурсов.

Практико-ориентированные решения. Одной из ключевых задач эвристических подходов является разработка правил, основанных на экспертных знаниях. Такие правила могут включать фильтрацию подозрительных IP-адресов, портов, аномальных последовательностей действий пользователей, а также шаблонов поведения, характерных для определённых видов атак. Например, для обнаружения DDoS-атак или подозрительных попыток аутентификации формируются наборы признаков и пороговых значений, при превышении которых событие помечается как потенциально опасное.

Гибридные методы, сочетающие сигнатурный анализ и машинное обучение, позволяют повысить эффективность обнаружения как известных, так и новых угроз. Примером может служить работа [10], где для выявления DDoS-атак используются как заранее определённые сигнатуры, так и обучаемые модели, способные адаптироваться к изменяющимся сценариям атак.

Оптимизация ресурсов. Для повышения производительности и снижения нагрузки на вычислительные системы применяются эвристики, направленные на предварительную кластеризацию событий. Энтропийный подход, предложенный [11], позволяет группировать события по степени их информационной насыщенности, выделяя наиболее значимые для дальнейшего анализа.

Динамическое изменение порогов срабатывания на основе исторической статистики позволяет адапти-

ровать систему к изменяющимся условиям эксплуатации и снижать количество ложных срабатываний. Например, если в определённые периоды наблюдается всплеск активности, система может автоматически корректировать пороговые значения, чтобы избежать избыточных оповещений и сосредоточиться на действительно критических инцидентах.

В целом, интеграция эвристических подходов с нейросетевыми и гибридными моделями обеспечивает баланс между эффективностью, прозрачностью и адаптивностью систем анализа журналов событий, что особенно важно для практического применения в корпоративных и промышленных инфраструктурах.

Секвенционный анализ. Секвенционный анализ, направленный на выявление закономерностей в последовательностях событий, играет ключевую роль в обнаружении сложных многоэтапных атак, таких как APT (Advanced Persistent Threat) и целенаправленные фишинговые кампании. В работах [12,13] предложен метод, сочетающий эвристические правила с вероятностными моделями для анализа временных цепочек событий.

Основой подхода является построение марковских моделей, описывающих переходы между состояниями системы (например, «нормальная активность», «подозрительный доступ», «попытка эксплуатации уязвимости»). Для каждого состояния вычисляются вероятности перехода к другим состояниям на основе исторических данных. Отклонения от ожидаемых переходов (например, резкий скачок попыток доступа к критическим ресурсам после сканирования портов) маркируются как потенциальные индикаторы атаки.

Практическое применение метода включает:

- Автоматическую генерацию шаблонов атак на основе анализа успешных инцидентов.
- Корреляцию событий из разных источников (сети, хосты, приложения) для построения единой временной линии угроз.
- Динамическую адаптацию моделей при появлении новых типов событий, что особенно важно для противодействия evolving-угрозам (эволюционирующие угрозы).

Исследования [12] демонстрируют, что комбинация секвенционного анализа с эвристическими правилами позволяет снизить уровень ложных срабатываний на 25 % по сравнению с чисто статистическими методами, а также сократить время обнаружения многоэтапных атак в корпоративных сетях.

Таким образом, интеграция секвенционного анализа с эвристическими подходами обеспечивает более глубокое понимание контекста событий и повышает эффектив-

ность систем мониторинга, особенно в условиях ограниченной размеченной обучающей выборки.

Интеграция исследуемых методов в SIEM-системы

Интеграция нейросетевых, эвристических и гибридных методов анализа журналов событий в современные SIEM-системы (Security Information and Event Management) позволяет существенно повысить уровень автоматизации, точность обнаружения угроз и скорость реагирования на инциденты. На рисунке 2 представлена схема организации работы центра обеспечения информационной безопасности.

Positive Technologies MaxPatrol SIEM. Платформа поддерживает внедрение гибридных аналитических модулей [14], сочетающих возможности машинного обучения, нейросетей и эвристических правил. Через специализированные API и плагины обеспечивается автоматизированная передача событий из журналов в интеллектуальные анализаторы, а результаты обработки возвращаются в систему для дальнейшей корреляции и визуализации. Такой подход позволяет не только выявлять сложные и ранее неизвестные угрозы, но и оперативно адаптировать правила реагирования на основе новых паттернов атак.

Kaspersky Unified Monitoring and Analysis Platform. Платформа интегрирует методы глубокого обучения (например, LSTM, автоэнкодеры) и эвристические фильтры для анализа больших потоков событий в реальном времени

[15]. Платформа обеспечивает масштабируемую обработку данных, что критично для крупных промышленных и распределённых инфраструктур. Интеллектуальные модули позволяют снижать количество ложных срабатываний, автоматизировать расследование инцидентов и формировать отчёты для специалистов по информационной безопасности.

Технические аспекты: API, масштабируемость. Техническая интеграция интеллектуальных методов в SIEM-системы реализуется через открытые API, поддерживающие обмен данными между ядром платформы и внешними аналитическими сервисами. Для обеспечения масштабируемости используются распределённые вычисления, контейнеризация и балансировка нагрузки. Особое внимание уделяется безопасности передачи данных, разграничению прав доступа и контролю целостности журналов событий. Интеграция современных методов анализа в SIEM-платформы позволяет не только повысить эффективность мониторинга и реагирования, но и создать основу для построения проактивных, самообучающихся систем информационной безопасности, способных адаптироваться к новым угрозам и минимизировать человеческий фактор в процессе обработки инцидентов.

Проблемы и перспективы решений по интеллектуальному анализу журналов событий

Внедрение нейросетевых и эвристических методов в анализ журналов событий открывает новые возможности для автоматизации и повышения эффективности



Рис. 2. Схема организации работы центра обеспечения информационной безопасности

информационной безопасности, однако сопровождается рядом вызовов, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации подобных систем.

Интерпретируемость решений. Одной из ключевых проблем остаётся низкая интерпретируемость сложных нейросетевых моделей, что затрудняет объяснение причин срабатывания системы и снижает доверие со стороны специалистов по информационной безопасности. Для повышения прозрачности используются методы объяснения решений, такие как визуализация важности признаков, применение XAI (Explainable AI), а также внедрение гибридных схем, где эвристические правила дополняют «чёрный ящик» ИИ и делают выводы более понятными для эксперта.

Оптимизация вычислительных ресурсов. Обработка больших объёмов событий в реальном времени требует значительных вычислительных мощностей, особенно при использовании глубоких нейронных сетей. Для оптимизации ресурсов применяются предварительная фильтрация, эвристическая кластеризация событий, распределённые вычисления, а также квантование и упрощение архитектуры моделей. Это позволяет снизить нагрузку на инфраструктуру и обеспечить масштабируемость решений для крупных корпоративных и промышленных систем.

Самообучающиеся системы. Перспективным направлением развития является создание самообучающихся и адаптивных систем, способных автоматически обновлять свои правила и параметры на основе новых данных и поведения атакующих [16]. Использование методов reinforcement learning, federated learning и динамической настройки порогов реагирования позволит системам быстрее адаптироваться к новым угрозам, минимизировать ложные срабатывания и поддерживать высокий уровень защищённости без постоянного участия эксперта.

В целом, дальнейшее развитие гибридных подходов, объединяющих нейросетевые и эвристические методы,

направлено на повышение эффективности, прозрачности и устойчивости систем анализа журналов событий, что особенно важно в условиях роста объёмов данных и появления всё более сложных киберугроз.

Выводы

Современный анализ журналов событий в информационной безопасности требует сочетания мощных инструментов искусственного интеллекта и гибких эвристических подходов. Нейронные сети, такие как LSTM, GRU и автоэнкодеры, позволяют выявлять сложные паттерны, анализировать временные зависимости и обнаруживать аномалии, ранее недоступные для классических методов. В то же время эвристические решения, основанные на экспертных правилах, исторической статистике и динамической адаптации порогов, обеспечивают прозрачность, интерпретируемость и оптимизацию вычислительных ресурсов.

Гибридные методы, объединяющие сильные стороны ИИ и эвристик, демонстрируют высокую эффективность в реальных корпоративных и промышленных системах, особенно при интеграции в современные SIEM-платформы, такие как MaxPatrol SIEM и Kaspersky Unified Monitoring and Analysis Platform. Такой подход позволяет не только повысить точность и скорость обнаружения угроз, но и снизить количество ложных срабатываний, а также обеспечить адаптацию к новым типам атак.

Ключевыми направлениями дальнейшего развития являются повышение интерпретируемости решений, внедрение самообучающихся систем и стандартизация форматов логов для интеллектуального анализа [17]. Комплексное применение нейросетевых и эвристических методов становится основой для построения надёжных, адаптивных и масштабируемых систем информационной безопасности, способных эффективно противостоять современным киберугрозам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sheeraz M., Durad M.H., Paracha M.A., Mohsin S.M., Kazmi S.N., Maple C. Revolutionizing SIEM Security: An Innovative Correlation Engine Design for Multi-Layered Attack Detection // *Sensors*. — 2024. — Т. 24, № 15. — С. 4901. — DOI: 10.3390/s24154901.
2. Sheeraz M., Paracha M.A., Haque M.U., Durad M.H., Mohsin S.M., Band S.S. и др. Effective security monitoring using efficient SIEM architecture // *Human-centric Computing and Information Sciences*. — 2023. — Т. 13. — С. 1–18.
3. Priambodo D.F., Prabowo H., Suryanegara M., Nugroho L.E. Collaborative Intrusion Detection System with Snort Machine Learning Plugin // *JOIV: International Journal on Informatics Visualization*. — 2024. — Т. 8, № 3. — С. 1230–1238.
4. Du M., Li F., Zheng G., Srikumar V. Deeplog: Anomaly detection and diagnosis from system logs through deep learning // *Proceedings of the 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*. — 2017. — С. 1285–1298.
5. Хасанова А.М. Интеллектуальный анализ процессов по данным журналов событий информационных систем / А.М. Хасанова // *International Journal of Open Information Technologies*. — 2022. — Т. 10, № 10. — С. 70–77. — EDN JIMCSN.
6. Анализ методов корреляции событий безопасности в Siem-системах. Часть 1 / A.V. Fedorchenko, D.S. Levshun, A.A. Chechulin, I.V. Kotenko // *Труды СПИИ-РАН*. — 2016. — № 4(47). — С. 5–27. — DOI 10.15622/sp.47.1. — EDN WHWSZZ.

7. Анализ методов корреляции событий безопасности в SIEM-системах. Часть 2 / А.В. Федорченко, Д.С. Левшун, А.А. Чечулин, И.В. Котенко // Труды СПИИ-РАН. — 2016. — № 6(49). — С. 208–225. — DOI 10.15622/sp.49.11. — EDN XHFTDR.
8. Методика оценивания защищенности на основе семантической модели метрик и данных / Е.В. Дойникова, А.В. Федорченко, И.В. Котенко, Е.С. Новикова // Вопросы кибербезопасности. — 2021. — № 1(41). — С. 29–40. — DOI 10.21681/2311–3456-2021-1-29-40. — EDN GUICXW.
9. Как можно и нужно пользоваться метриками информационной безопасности [Электронный ресурс] // Habr.com. — 2024. — URL: <https://habr.com/ru/articles/827178/> (дата обращения: 18.04.2025).
10. Зубкова Е.В. Сигнатурный анализ и машинное обучение для повышения эффективности обнаружения известных и новых угроз // Информационная безопасность. — 2023. — № 4. — С. 45–52.
11. Полтавцева М.А. Энтропийный подход к кластеризации событий для повышения производительности вычислительных систем // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2022. — № 3. — С. 58–65.
12. Шелухин О.И. Диагностика «здоровья» компьютерной сети на основе секвенциального анализа последовательностных паттернов / О.И. Шелухин, А.В. Осин, Д.В. Костин // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2020. — Т. 14, № 2. — С. 9–16. — DOI 10.36724/2072–8735–2020-14-2-9-16. — EDN IHWDMD.
13. Шелухин О.И. Мониторинг и диагностика аномальных состояний компьютерной сети на основе изучения «исторических данных» / О.И. Шелухин, А.В. Осин, Д.В. Костин // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2020. — Т. 14, № 4. — С. 23–30. — DOI 10.36724/2072–8735–2020-14-4-23-30. — EDN AQKPYX.
14. Обзор MaxPatrol SIEM 8.0, системы мониторинга ИБ-событий и реагирования на инциденты [Электронный ресурс] // Anti-Malware.ru. — 2023. — 27 октября. — URL: <https://www.anti-malware.ru/reviews/MaxPatrol-SIEM-8-0> (дата обращения: 21.04.2025).
15. Обзор Kaspersky Unified Monitoring and Analysis Platform (KUMA) [Электронный ресурс] // Anti-Malware.ru. — 2021. — URL: <https://www.anti-malware.ru/reviews/Kaspersky-Unified-Monitoring-and-Analysis-Platform> (дата обращения: 23.04.2025).
16. Self-Learning AI in Adaptive Threat Mitigation [Электронный ресурс] // Insights2TechInfo. — 2023. — URL: <https://insights2techinfo.com/self-learning-ai-in-adaptive-threat-mitigation/> (дата обращения: 3.05.2025).
17. Розум Р.С. Архитектура автоматизированной информационной системы обработки и семантического анализа запросов к системам обслуживания реального времени / Р.С. Розум, А.С. Кузнецов // Тенденции развития науки и образования. — 2024. — № 115–15. — С. 101–107. — DOI 10.18411/trnio-11-2024-709. — EDN DOSWGC.

© Русаков Алексей Михайлович (rusakov_a@mirea.ru); Бобырь-Бухановский Александр Игоревич (s5696998@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА КЛОНАЛЬНОГО ОТБОРА В ИСКУССТВЕННЫХ ИММУННЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АТАК ТИПА ОТКАЗА В ОБСЛУЖИВАНИИ

MATHEMATICAL MODELING OF THE CLONAL SELECTION ALGORITHM IN ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEMS FOR THE DETECTION OF DENIAL-OF-SERVICE ATTACKS

**A. Sokolov
S. Artemova
D. Potapova
A. Brysin**

Summary. In the article, a mathematical model of the clonal selection algorithm, adapted for detecting denial-of-service (DDoS) attacks within the framework of artificial immune systems, is presented. The process of formalizing the feature spaces of network traffic and the principles of interaction between detectors (antibodies) and network events (antigens) is described. Special attention is given to the mechanisms of cloning, mutation, and selection of detectors, as well as their adaptation to the dynamic conditions of the network environment. The model takes into account the temporal characteristics of network traffic and implements adaptive updating of detectors, ensuring resilience against new and multi-phase attacks. An experimental analysis of the model's effectiveness was conducted using classification quality metrics. The obtained results confirm the applicability of the proposed approach for real-time detection of DDoS attacks.

Keywords: artificial immunity, clonal selection, DDoS attacks, mathematical modeling, anomaly detection, network traffic, information security.

Соколов Александр Сергеевич

МИРЭА=Российский технологический университет
Sokols601@gmail.com

Артемова Светлана Валерьевна

Доктор технических наук, доцент, МИРЭА=Российский
технологический университет
artemova_s@mirea.ru

Потапова Дарья Александровна

преподаватель, старший научный сотрудник,
МИРЭА=Российский технологический университет
Potapova.daria1998@yandex.ru

Брысин Андрей Николаевич

Кандидат технических наук, доцент, Институт
машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
МИРЭА=Российский технологический университет
brysin@rambler.ru

Аннотация. В статье представлена математическая модель алгоритма клонального отбора, адаптированная для обнаружения атак типа отказа в обслуживании (DDoS) в рамках концепции искусственных иммунных систем. Описан процесс формализации пространств признаков сетевого трафика и принципов взаимодействия между детекторами (антителами) и сетевыми событиями (антигенами). Особое внимание уделено механизмам клонирования, мутации и селекции детекторов, а также их адаптации к динамическим условиям сетевой среды. Модель учитывает временные характеристики сетевого трафика и реализует адаптивное обновление детекторов, что обеспечивает устойчивость к новым и многофазным атакам. Проведён экспериментальный анализ эффективности модели с применением метрик качества классификации. Полученные результаты подтверждают применимость предложенного подхода для обнаружения DDoS-атак в реальном времени.

Ключевые слова: искусственный иммунитет, клональный отбор, DDoS-атаки, математическое моделирование, обнаружение аномалий, сетевой трафик, информационная безопасность.

Введение

Распределенные атаки типа отказа в обслуживании (DDoS) являются одной из наиболее серьезных угроз в области кибербезопасности. [1, с. 212] Они нацелены на нарушение доступности сетевых ресурсов. Эти атаки характеризуются массовой отправкой запросов к целевому серверу, что приводит к его перегрузке и отказу в обслуживании. В условиях стремительного

роста объемов сетевого трафика и усложнения методов атак разработка эффективных систем обнаружения становится критически важной задачей.

Искусственные иммунные системы (ИИС) [2, с. 344] предлагают перспективный подход к обнаружению DDoS-атак благодаря их способности моделировать биологические процессы иммунитета. Алгоритм клонального отбора, лежащий в основе ИИС, имитирует процесс

выбора и размножения антител, наиболее эффективный для распознавания патогенов. Данный механизм позволяет системе адаптироваться к новым угрозам, включая атаки нулевого дня.

Алгоритм клонального отбора базируется на принципах биологического иммунитета, где антитела с высокой аффинностью к антигенам проходят процесс клонирования и мутации для улучшения своей эффективности. В контексте обнаружения DDoS-атак сетевой трафик рассматривается как совокупность антигенов, а детекторы — как антитела, распознающие аномалии. Такой подход позволяет моделировать сложные сетевые взаимодействия в терминах биологических процессов.

Целью данного исследования является разработка математической модели алгоритма клонального отбора, адаптированной для обнаружения атак типа отказа в обслуживании. Модель должна учитывать динамичность сетевого трафика и обеспечивать высокую точность распознавания аномалий. [2, с. 344] Особое внимание уделяется способности системы обновлять свои детекторы для противодействия атакам. Понимание механизмов клонального отбора, заимствованных из биологии, позволяет формализовать процессы распознавания аномалий в сетевом трафике для построения математической модели для данного процесса.

Теоретическое обоснование

Искусственная иммунная система (ИИС) представляет собой вычислительный подход, основанный на прин-

ципах работы биологической иммунной системы, которая защищает организм от патогенов. Биологическая иммунная система функционирует как распределенная адаптивная система, способная распознавать и нейтрализовать патогены посредством сложных механизмов взаимодействия клеток. Одним из процессов является клональный отбор, при котором В-лимфоциты, продуцирующие антитела с высокой аффинностью к антигенам, размножаются и подвергаются мутациям. Этот процесс представлен на рисунке 1 как цикл, включающий распознавание, клонирование, мутацию и отбор.

В искусственных иммунных системах антигены представляют собой характеристики сетевого трафика, такие как частота запросов, объем данных или временные интервалы между пакетами. Антитела, или детекторы, являются математическими конструкциями, которые сопоставляются с этими характеристиками. Для иллюстрации принципа клонального отбора построим двумерную модель пространства признаков с детекторами аномального поведения. На ней антигены изображаются точками в многомерном пространстве (например, на плоскости с осями «частота запросов» и «объем данных»), где нормальный трафик образует плотные кластеры, а аномалии располагаются обособленно. Детекторы, обозначаемые как d покрывают области аномалий, но не пересекаются с зонами нормальной активности. Модель, продемонстрированная на рисунке 2, наглядно демонстрирует, как система «обучается»: детекторы адаптируются, чтобы точнее выявлять угрозы и минимизировать ложные срабатывания.

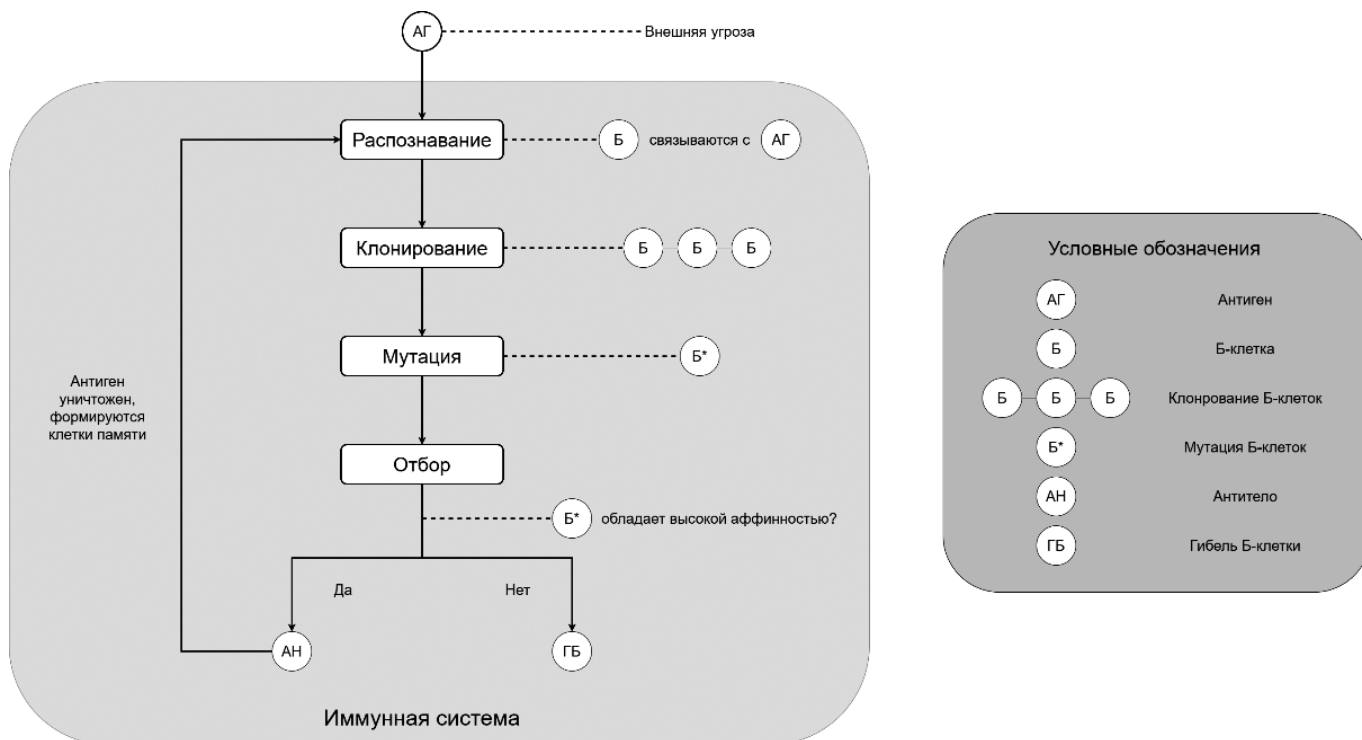


Рис. 1. Алгоритм клонального отбора

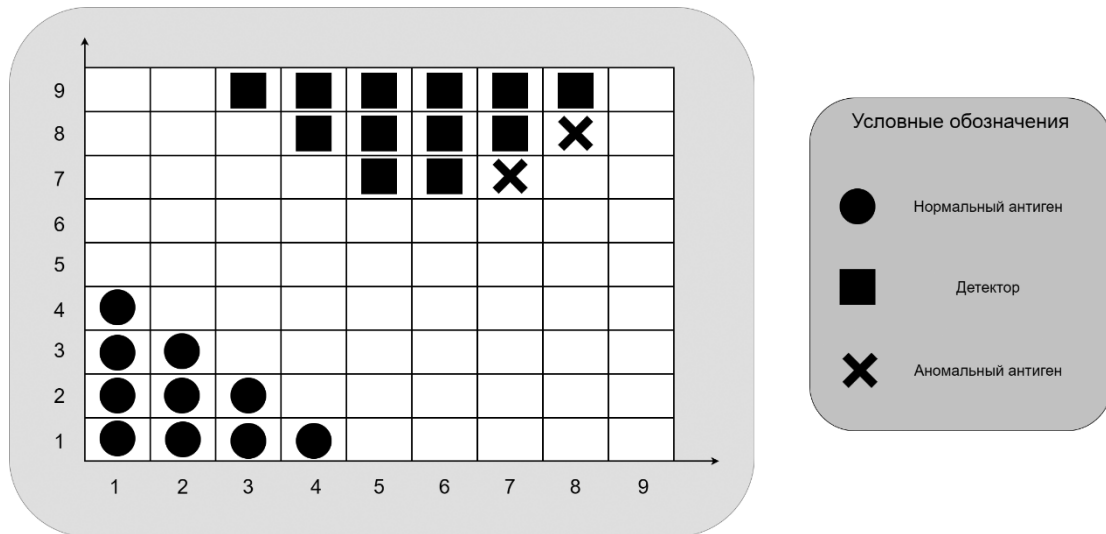


Рис. 2. Двумерная модель пространства признаков с детекторами аномального поведения

На основе модели пространства признаков [3, с. 41] формализуем процесс клонального отбора, что позволит количественно описать взаимодействие детекторов и антигенов в математических терминах.

Математическая формализация клонального отбора начинается с определения пространства признаков сетевого трафика. Например, трафик можно представить как вектор:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

где x_i — это метрики, такие как интенсивность пакетов или размер заголовков, а n — размерность пространства признаков, определяемая количеством выбранных метрик.

Аффинность между детектором d и антигеном x рассчитывается как расстояние, например, евклидово:

$$\text{aff}(d, x) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (d_i - x_i)^2}$$

Детекторы с низким значением расстояния (высокой аффинностью) отбираются для клонирования.

Адаптация модели к задаче обнаружения DDoS-атак [4, с. 551] требует учета динамики сетевого трафика. Детекторы должны иметь ограниченный период существования, чтобы система могла обновляться в ответ на изменения. Например, каждый детектор может быть ассоциирован с параметром времени жизни τ , который уменьшается с каждым циклом анализа.

Математическая модель алгоритма клонального отбора

На основе теоретической формализации клонального отбора, описанной ранее, где сетевой трафик пред-

ставлен как векторы характеристик в многомерном пространстве признаков, разработаем математическую модель алгоритма клонального отбора. Эта модель формализует процессы распознавания аномалий, клонирования, мутации и селекции детекторов, обеспечивая адаптацию к динамической природе DDoS-атак [4, с. 555].

Математическая модель клонального отбора начинается с формализации представления сетевого трафика как множества антигенов:

$$Ag = \{x_1, x_2, \dots, x_m\},$$

где каждый $x_i \in R^n$. Детекторы формируют множество $Ab = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$, где каждый детектор d_j характеризуется центром $c_j \in R^n$ и радиусом r_j . Задача состоит в том, чтобы покрыть пространство аномального трафика, минимизируя ложные срабатывания на нормальный трафик.

Для определения соответствия между антигенами и детекторами используется функция аффинности, которая измеряет близость между ними. В данной модели аффинность вычисляется как евклидово расстояние:

$$\text{aff}(x_i, d_j) = x_i - c_j.$$

Детектор активируется, если $\text{aff}(x_i, d_j) \leq r_j$, сигнализируя о возможной аномалии. Этот подход позволяет точно выделять области пространства признаков, где сосредоточены аномальные паттерны.

Процесс клонирования усиливает способность модели к распознаванию аномалий. Детекторы с высокой аффинностью (низким расстоянием до антигенов) создают N_c копий, где $N_c = \beta \times \text{aff}(x_i, d_j)^{-1}$, а β — коэффициент,

регулирующий интенсивность клонирования. Клонирование как указано в работе [5, с. 305] увеличивает плотность детекторов в областях, где аномалии наиболее вероятны, улучшая точность обнаружения.

Клоны подвергаются мутации для исследования новых областей пространства признаков и предотвращения переобучения на известные аномалии. Мутация моделируется как случайное возмущение центра детектора:

$$c'_j = c_j + \epsilon,$$

где $\epsilon \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$. Параметр σ адаптируется в зависимости от плотности антигенов, обеспечивая баланс между исследованием новых паттернов и сохранением обобщающей способности модели.

Селекция детекторов направлена на выбор наиболее эффективных элементов, способных распознавать аномалии с минимальным перекрытием нормального трафика. Это достигается через минимизацию функции потерь:

$$L(d_j) = \sum_{x_i \in Ag} (aff(x_i, d_j) \leq r_j) - \lambda \sum_{x_i \in Norm} (aff(x_i, d_j) \leq r_j),$$

где λ — коэффициент штрафа за ложные срабатывания. Итеративная оптимизация функции потерь обеспечивает сходимость модели к оптимальному покрытию.

Адаптивность модели к изменяющимся DDoS-атакам реализуется через механизм обновления детекторов [6]. Каждый детектор имеет время жизни τ , которое уменьшается с каждым циклом анализа. Если детектор d_j не активизируется в течение τ_j , он удаляется, а новый генерируется в области с низким покрытием. Этот процесс позволяет системе реагировать на новые типы атак, такие как многофазные DDoS-атаки.

Для повышения эффективности модель оптимизирует гиперпараметры, такие как β , σ и τ , с использованием методов градиентного спуска или эвристических алгоритмов. Оптимизация направлена на максимизацию точности и полноты обнаружения при минимизации вычислительных затрат. Такой подход делает модель применимой в реальных сетевых средах с высокими объемами трафика.

Визуализация и интерпретация модели

Для оценки эффективности разработанной математической модели клонального отбора была проведена серия экспериментов, направленных на анализ её способности обнаруживать DDoS-атаки в условиях динамического сетевого трафика. Основной задачей визу-

ализации является демонстрация сходимости модели, выраженной через уменьшение функции потерь в процессе итеративной оптимизации. Визуализация позволяет интерпретировать поведение модели, выявляя её адаптивность и точность при распознавании аномалий.

Эффективность модели оценивалась с использованием метрик точности (Precision), полноты (Recall) и F1-меры. Точность определялась как доля правильно идентифицированных аномалий среди всех событий, классифицированных как аномальные:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP},$$

где TP — истинно положительные срабатывания, FP — ложноположительные.

Полнота измеряла долю обнаруженных аномалий из всех реальных аномалий:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN},$$

где FN — ложноотрицательные случаи [7].

F1-мера, рассчитываемая как

$$F1 = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall},$$

обеспечивала сбалансированную оценку. Эти метрики позволили объективно оценить качество обнаружения и минимизировать субъективные суждения о нормальности работы модели.

Процесс визуализации начинается с построения графика зависимости функции потерь L от номера итерации, что отражает динамику обучения модели. Функция потерь оценивает качество детекторов, балансируя между покрытием аномального трафика и минимизацией ложных срабатываний. Для эксперимента было выполнено 50 итераций, в ходе которых значения L фиксировались для каждого цикла.

В качестве входных данных использовались синтетические наборы данных, имитирующие сетевой трафик с нормальными и аномальными характеристиками. Антигены представляли собой векторы признаков, включающие метрики, такие как интенсивность пакетов и энтропия заголовков. Параметры модели, включая коэффициент клонирования $\beta = 10$, дисперсию мутации $\sigma^2 = 0,5$ и штраф за ложные срабатывания $\lambda = 0,5$, были предварительно оптимизированы для обеспечения устойчивости результатов.

На начальном этапе эксперимента значение функции потерь составило около 100 условных единиц, что

указывает на низкую начальную точность детекторов и большое число ложных срабатываний. С каждой итерацией, благодаря процессам клонирования [8, с. 8642], мутации и селекции, функция потерь экспоненциально уменьшалась, достигая уровня около 10 единиц к 50-й итерации. Это демонстрирует способность модели к самообучению и адаптации к сложным паттернам аномального трафика.

Для построения графика зависимости функции потерь от номера итерации значения L были рассчитаны по формуле:

$$L_t = L_0 \times e^{-kt} + C,$$

где $L = 100$, $k = 0,05$, $C = 10$, а t — номер итерации.

Интерпретация графика показывает, что модель быстро улучшает качество покрытия аномального трафика в первые 20 итераций, после чего скорость уменьшения функции потерь замедляется, достигая минимального уровня. Это подтверждает высокую эффективность алгоритма клонального отбора в задаче обнаружения DDoS-атак. Достижение низкого уровня функции потерь соответствует увеличению F1-меры до 0.92, как это показано на рисунке 3 к 50-й итерации, что указывает на оптимальный баланс между точностью и полнотой обнаружения.

Визуализация также позволяет оценить адаптивность модели к новым типам атак. График сходимости, продемонстрированный на рисунке 4, показывает, что модель успешно обновляет детекторы систем обнаружения вторжений [9], сохраняя низкий уровень функции потерь даже при изменении характера трафика, что подтверждает её применимость в реальных условиях.

Заключение

Полученные результаты исследования позволяют утверждать, что разработанная математическую модель алгоритма клонального отбора в искусственных иммунных системах может использоваться для обнаружения атак типа отказа в обслуживании. Визуализация процесса сходимости функции потерь демонстрирует способность модели к самообучению, обеспечивая точное распознавание аномального сетевого трафика при минимальном уровне ложных срабатываний. Предложенный подход может быть рекомендован специалистам в области кибербезопасности как перспективный метод обнаружения угроз, в сочетании с другими алгоритмами машинного обучения.

Динамика F1-меры при обучении модели клонального отбора

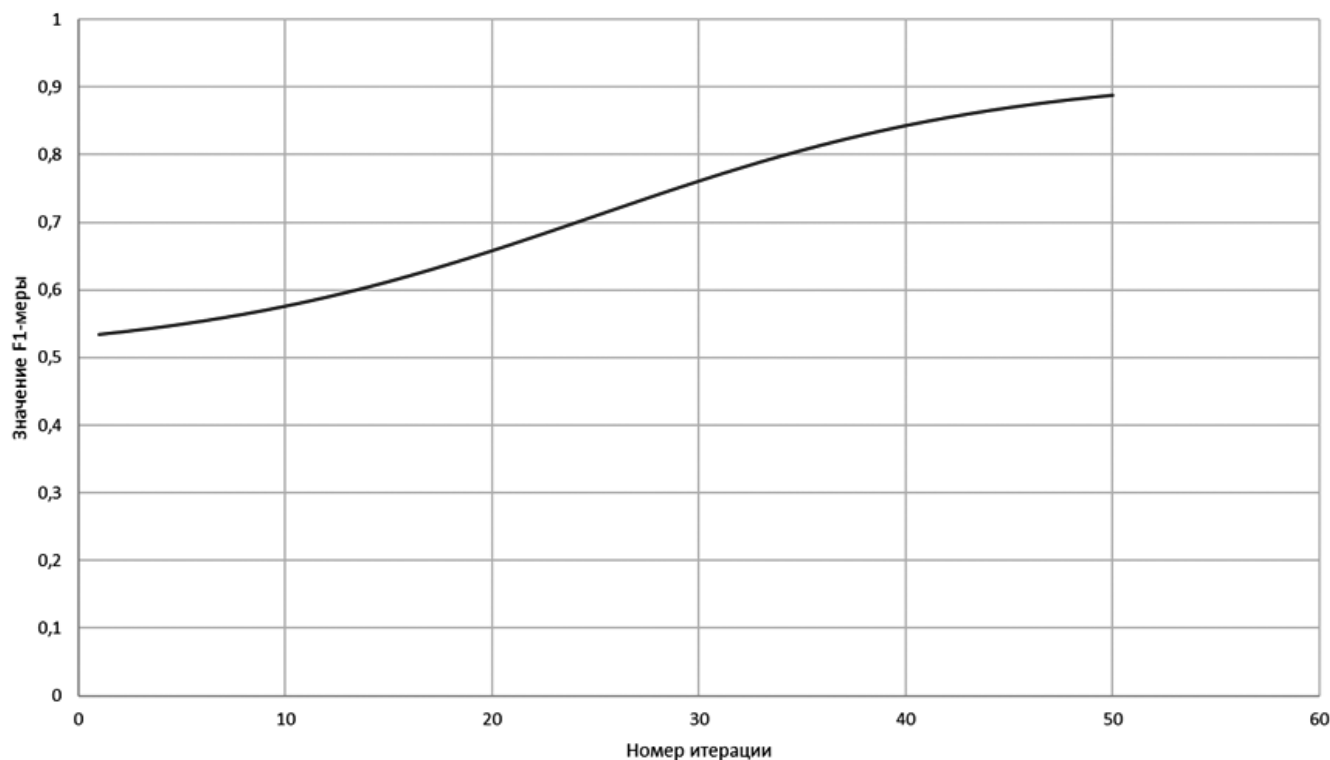


Рис. 3. Динамика F1-меры при обучении модели клонального отбора

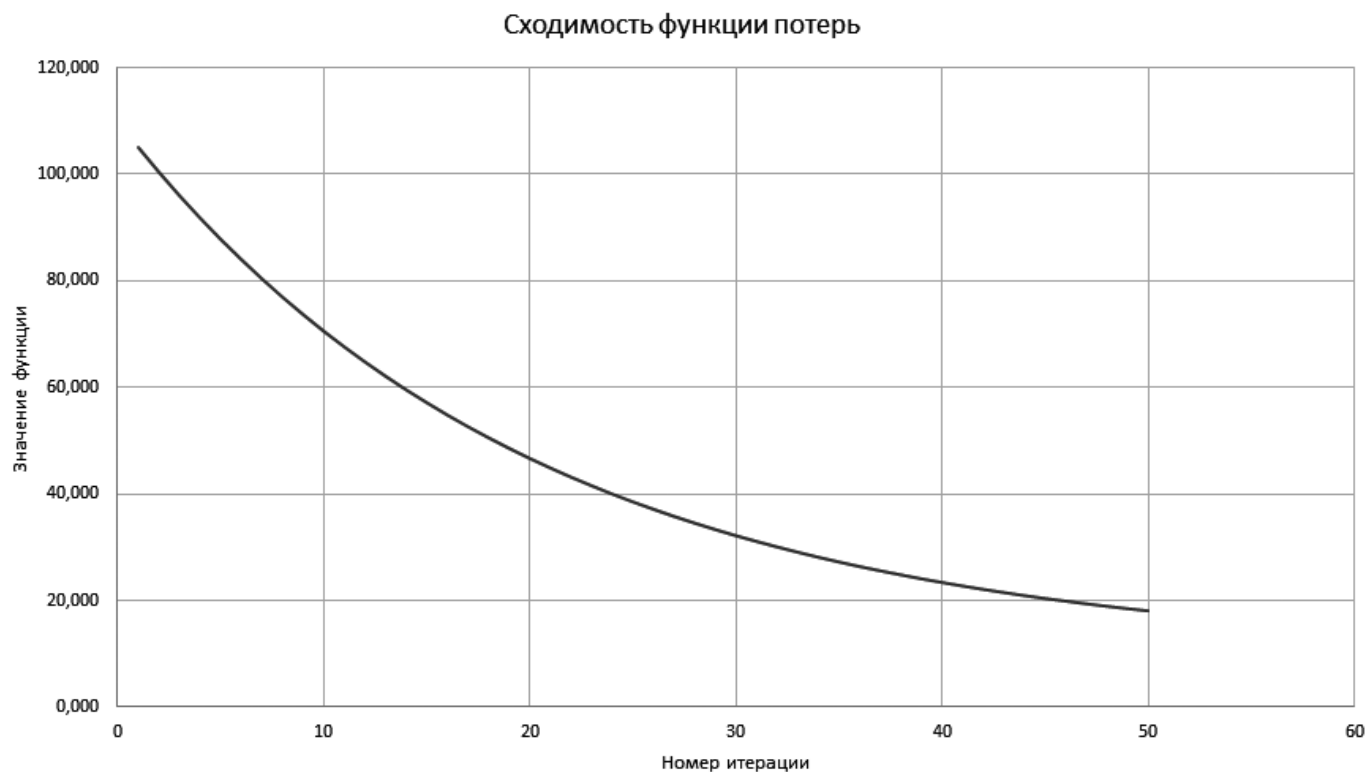


Рис. 4. Сходимость функции потерь

ЛИТЕРАТУРА

1. Скобцов Ю.А. Введение в искусственные иммунные системы: учебное пособие. — М., СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. — 212 с. [Дата обращения: 29.04.2025].
2. Дасгупта В. Введение в искусственные иммунные системы: учебное пособие. — Букинист, 2006. — 344 с. [Дата обращения: 29.04.2025].
3. Митяков Е.С., Максимова Е.А., Артемова С.В., Бакаев А.А., Вегера Ж.Г. Моделирование процессов управления инцидентами информационной безопасности на предприятии // Russian Technological Journal. — 2019. — С. 39–47. [Дата обращения: 30.04.2025].
4. Калашников А.О., Максимовский А.Ю. Развитие автоматных моделей мониторинга информационной безопасности сетевых объектов // Информация и безопасность. — ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2019. — С. 549–556. [Дата обращения: 30.04.2025].
5. Потапова Д.А., Ушаков Д.А. Применение генетических алгоритмов для оптимизации систем защиты информации. Кибербезопасность: технические и правовые аспекты защиты информации // Сборник научных трудов I Национальной научно-практической конференции. — С. 304–309. [Дата обращения: 30.04.2025].
6. Apostu, A., Gheorghe, S., Hiji, A., Cleju, N., Pătrașcu, A., Rusu, C., Ionescu, R., Irofti, P. Detecting and Mitigating DDoS Attacks with AI: A Survey [Электронный ресурс] // arXiv.org. — 2025. — 22 марта. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2503.17867> (дата обращения: 01.05.2025).
7. de Melo L.H., Bertoli G.C., Nogueira M., dos Santos A.L., Pereira Junior L.A. Anomaly-Flow: A Multi-domain Federated Generative Adversarial Network for Distributed Denial-of-Service Detection [Электронный ресурс] // arXiv.org. — 2025. — 18 марта. — Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2503.14618> (дата обращения: 01.05.2025).
8. Ramzan M., Shoaib M., Altaf A., Arshad S., Iqbal F., Castilla Á.K., Ashraf, I. Distributed Denial of Service Attack Detection in Network Traffic Using Deep Learning Algorithm [Электронный ресурс] // Sensors. — 2023. — Т. 23, № 20. — С. 8642. — DOI: <https://doi.org/10.3390/s23208642> (дата обращения: 03.05.2025).
9. Gautam R., Padmavathy R. Distributed denial of service attack detection using machine learning classifiers [Электронный ресурс] // International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing. — 2024. — Режим доступа: <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJAHUC.2024.140032> (дата обращения: 04.05.2025).

© Соколов Александр Сергеевич (Sokols601@gmail.com); Артемова Светлана Валерьевна (artemova_s@mirea.ru);
 Потапова Дарья Александровна Potapova.daria1998@yandex.ru); Брысин Андрей Николаевич (brysin@rambler.ru)
 Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА КОГНИТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АНАЛИЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ СЛАБОСТРУКТУРИРОВАННЫХ И ПЛОХО ФОРМАЛИЗУЕМЫХ СИСТЕМ

SUBSTANTIATION OF THE USE OF MATHEMATICAL APPARATUS OF COGNITIVE MODELING FOR SOLVING PROBLEMS OF ANALYSIS OF FUNCTIONING AND FORECASTING BEHAVIOR OF POORLY STRUCTURED AND POORLY FORMALIZED SYSTEMS

D. Suzdalsky

Summary. The article argues for the use of cognitive modeling, which is an effective tool for analyzing and modeling complex systems that are difficult to structure and quantify. Such systems, known as poorly structured and poorly formalized (SPF systems), are characterized by the lack of clear quantitative relationships between their elements. This is especially evident in socio-economic systems (SES), where a person acts not only as a controlled element, but also as an active subsystem with its own goals and interests, which may contradict the overall goals of the system. A review of existing sources revealed that SPF systems differ in that their behavior and processes cannot be adequately described using quantitative indicators and mathematical models, which significantly complicates their analysis and forecasting. It is emphasized that the most appropriate way to assess the state of the SPF system is to use the mathematical apparatus of cognitive modeling. The modeling technique is presented with a detailed description of the mathematical apparatus.

Keywords: cognitive modeling, poorly structured and poorly formalized systems, SPF systems, socio-economic systems, SES.

Суздальский Дмитрий Андреевич

аспирант,

*Российский Экономический Университет, г. Москва
ya.jummer@yandex.ru*

Аннотация. В статье аргументируется применение когнитивного моделирования, которое представляет собой эффективный инструмент для анализа и моделирования сложных систем, которые трудно поддаются структуризации и количественной оценке. Такие системы, известные как слабоструктурированные и плохо формализуемые (СПФ-системы), характеризуются отсутствием четких количественных взаимосвязей между их элементами. Особенно ярко это проявляется в социально-экономических системах (СЭС), где человек выступает не только как управляемый элемент, но и как активная подсистема со своими целями и интересами, которые могут противоречить общим целям системы.

Проведенный обзор существующих источников выявил, что СПФ-системы отличаются тем, что их поведение и процессы невозможно адекватно описать с помощью количественных показателей и математических моделей, что существенно усложняет их анализ и прогнозирование.

Подчеркивается, что наиболее подходящим способом оценки состояния СПФ-системы является применение математического аппарата когнитивного моделирования. Приведена методика моделирования с подробным описанием математического аппарата.

Ключевые слова: когнитивное моделирование, слабоструктурированные и плохо формализуемые системы, СПФ-системы, социально-экономические системы, СЭС.

Введение

В течение последних трех десятилетий в сфере нечетких когнитивных карт (НKK) произошел значительный прогресс в развитии математического инструментария для когнитивного моделирования. Эти карты стали важной составляющей области мягких вычислений, поскольку они демонстрируют высокую эффективность при решении широкого спектра задач, включая поддержку принятия решений, управление сложными системами и прогнозирование различных процессов. Ключевым преимуществом таких моделей является их

способность работать с большим количеством переменных, включая те, что имеют нечеткие, неопределенные значения, что существенно расширяет возможности их практического применения.

Широкое применение методов когнитивного моделирования обусловлено возможностями его математического аппарата, который и процессах позволяет:

- а) оценивать ситуацию и анализировать на основе когнитивной карты взаимовлияния действующих факторов, определяющих возможные сценарии развития ситуации;

- b) выявлять тенденции развития ситуаций и реальные намерения их участников;
- c) разрабатывать стратегию использования тенденций развития ситуации;
- d) определять возможные механизмы взаимодействия участников ситуации для достижения ее целенаправленного развития;
- e) выработать и обосновать направления управления ситуацией;
- f) определить возможные варианты развития ситуации с учетом последствий принятия важнейших решений и сравнить их.

В общем случае, когнитивная карта представляет собой схематичное, упрощенное описание картины мира индивида, точнее, — ее фрагмента, относящегося к данной проблемной ситуации.

Когнитивные карты и методы когнитивного моделирования

Когнитивные карты и методы когнитивного моделирования активно применяются для изучения и моделирования слабоструктурированных и плохо формализуемых систем (СПФ-систем). В таких системах практически отсутствуют четкие количественные связи между компонентами. При их структурировании количество элементов минимизируется для придания описанию более определенного характера. Слабая структурированность обычно связана с человеческим фактором. В СПФ-системах, к которым относится социально-экономическая система (СЭС), человек выступает как объект управления. При этом компоненты СЭС являются активными подсистемами, чьи цели могут противоречить общим целям системы. Плохо формализуемые системы характеризуются тем, что их функционирование невозможно описать количественными показателями. Это происходит потому, что параметры определяются не через объективные измерения, а на основе экспертных оценок. В таких системах возможные альтернативы не задаются заранее, а формируются непосредственно в процессе анализа.

Сложность структурирования и формализации СПФ — систем определяется такими их свойствами как: нелинейность, нестационарность, неаддитивность и стохастичность [1]. Особенности моделирования СПФ — систем и процессов отражает рисунок 1.

Когнитивное моделирование представляет собой метод анализа, который позволяет определить, как различные факторы влияют на достижение желаемого состояния объекта управления. Этот метод учитывает не только силу воздействия каждого фактора, но и различия в их влиянии на систему.

Особенности моделирования СПФ-систем

- **наличие человеческого фактора**
- **наличие системы экономических интересов, отражающей цели деятельности человека**
- **структура деятельности человека зависит от ресурсов и возможностей их использования**
- **построение структуры СПФ-системы возможно на основе организации и самоорганизации**
- **управление СПФ-системой и процессом должно соответствовать текущим и перспективным интересам человека**

Рис. 1. Особенности моделирования слабоструктурированных и плохо формализуемых систем и процессов

Когнитивная карта представляет собой специальный вид ориентированного графа, где:

- Выделяется главная (целевая) вершина, описывающая будущее состояние объекта управления;
- Остальные вершины отображают различные факторы;
- Связи между факторами и целевой вершиной обозначаются стрелками разной толщины и со знаком, показывающим силу и направление влияния;
- Связи между факторами демонстрируют их схожесть или различие в воздействии на систему.

Элементы когнитивной карты называются концептами. Они подразделяются на три основные категории:

- Управляемые концепты (факторы, на которые можно оказывать влияние);
- Неуправляемые концепты (факторы, находящиеся вне контроля);
- Целевые концепты (желаемые состояния системы).

В качестве примера можно привести когнитивную карту, показывающую, как различные угрозы влияют на активы организации, которые, в свою очередь, влияют на конфиденциальность, целостность и доступность. Такая карта позволяет наглядно увидеть взаимосвязи между различными параметрами и их воздействие, рисунок 2.

Экспертная оценка играет ключевую роль в когнитивном моделировании, позволяя определить степень влияния различных факторов друг на друга и воздействие факторов на целевые показатели системы.

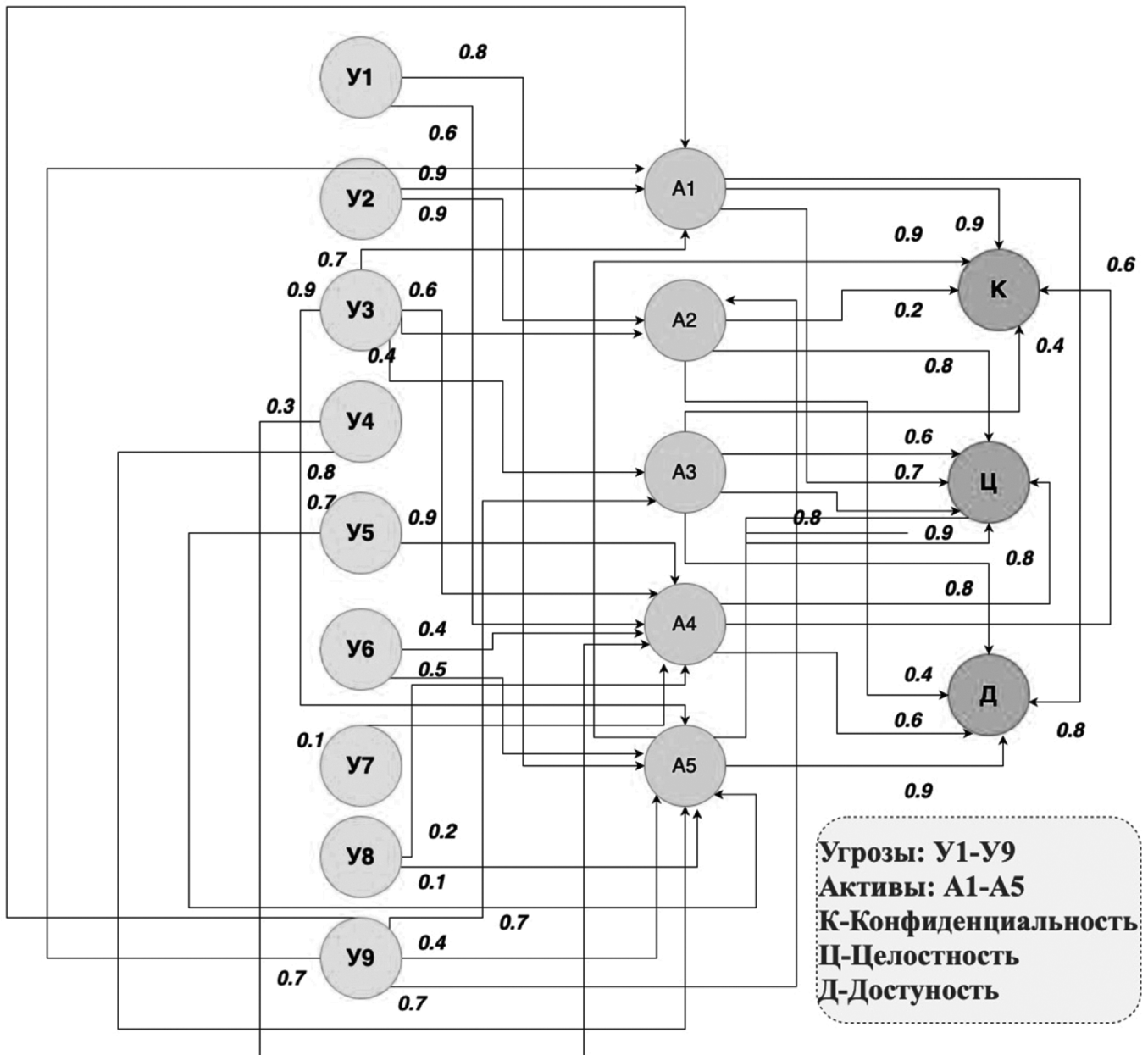


Рис. 2. Когнитивная карта взаимосвязи выявленных угроз и целевых показателей «Конфиденциальность, целостность, доступность»

Когнитивное моделирование предоставляет два важных аналитических инструмента:

- Возможность прогнозирования изменения целевого показателя при воздействии на управляющие факторы;
- Решение обратной задачи — формирование стратегии воздействий для достижения заданного значения целевого показателя.

Основные преимущества когнитивных моделей: выявление структуры причинно-следственных (каузальных) связей в сложных системах, которые невозможно проанализировать традиционными количественными

методами; эффективное использование экспертных знаний и опыта в конкретной предметной области; высокая наглядность представления информации, что облегчает понимание и анализ сложных взаимосвязей между компонентами системы; возможность работы с качественными оценками при отсутствии достаточных количественных данных; гибкость в адаптации модели под конкретные задачи исследования; способность учитывать неопределенность и неоднозначность в оценках влияния различных факторов.

Такой подход особенно ценен при анализе социально-экономических систем, где традиционные методы

часто оказываются недостаточно эффективными из-за сложности формализации многих важных факторов и взаимосвязей между ними [1–2].

На рисунке 3 представлен циклический процесс когнитивного моделирования, обеспечивающий анализ и принятие решений в плохо определенных ситуациях и, в частности, с использованием метода сценарного прогнозирования (планирования) на основе когнитивных карт, который позволяет определить вероятные (возможные) тенденции развития событий по альтернативным вариантам, а также возможные последствия принимаемых решений с целью выбора наиболее предпочтительной альтернативы.

В этом случае функционирование исследуемой системы S представляется в виде когнитивной карты K_S , на основе которой строится модель развития системы, учитывающая ее особенности на основе выявления проблемных ситуаций и обоснования управляющих воздействий для их разрешения. При этом задается целевой образ исследуемой системы, определяющий необходимые (желательные) изменения состояния системы в виде выражения 1.1:

$$S = (X^C R(X^C), \quad (1.1)$$

где X^C — множество целевых факторов; $R(X^C)$ — вектор оценок динамики факторов, которые определяют необ-

ходимые (желательные) направления изменения целевых факторов [3].

В общем случае исследование слабоструктурированных и плохо формализуемых систем может быть представлено в виде метанабора моделей, (рисунок 4), а формальная когнитивная модель объекта исследования — в виде Кортжа вида 1.2:

$$M_S = \langle K_F(X_{\text{ВНЕШ}} \cup X_{\text{ВНУТР}}), f_{KF}; C(X^C R(X^C)); \{AS^p(H_c^p, H_y^p)\}, X(0); G(0) \rangle \quad (1.2)$$

где: $K_F(X_{\text{ВНЕШ}} \cup X_{\text{ВНУТР}})$ — когнитивная карта ситуации, включающая множество внешних и внутренних факторов, влияющих на целевые факторы объекта исследования;

$A = [a_{ij}]$ матрица $N \times N$, определяющая взаимовлияние факторов x_i и x_j ;

f_{KF} — функция, задающая правило изменения значений факторов;

$AS^p(H_c^p, H_y^p)$, — множество субъектов p , которые влияют на ситуацию,

H_c — множество факторов, относящихся к области интересов субъекта;

H_u — множество факторов, на которые субъект может оказывать воздействие;

$X(0)$ — начальное состояние ситуации;

$G(0)$ — вектор дополнительных внешних воздействий субъекта на факторы при моделировании изменения ситуаций.



Рис. 3. Циклический процесс когнитивного моделирования [22]



Рис. 4. Метанабор моделей исследования слабоструктурированных и плохо формализуемых систем

Когнитивные модели позволяют обеспечить решение двух классов задач, рисунок 5:

- саморазвития (динамического анализа саморазвития ситуации для определения значений целевого фактора при текущих значениях внешних и внутренних факторов);
- управляемого развития:
 - прогнозирования ситуации путем определения состояния целевого фактора при существующих (текущих) и возможных воздействиях на внешние и внутренние факторы (прямая задача);
 - управляемого развития, позволяющая определить какие воздействия необходимо оказать на внешние и внутренние факторы (концепты), чтобы достичь заданное состояние целевого фактора (обратная задача).

На рисунке 6 представлена структурная схема процесса когнитивного моделирования слабоструктурированных и плохо формализуемых систем [4].

Процесс когнитивного моделирования укрупненно включает 3 этапа [1]:

1. Анализ проблемного поля ситуации построение когнитивной карты;
2. Структурно-целевой анализ и верификация когнитивной модели;



Рис. 5. Задачи, решаемые на основе когнитивных карт

3. Сценарное статическое и динамическое моделирование.

Статическое моделирование обеспечивает оценку взаимовлияния между концептами и цепочками концептов, влияния концепта на систему и наоборот, оценку консонанса (меры доверия к знаку и силе воздействия) и др. В рамках статического моделирования проводится расчет системных показателей когнитивной карты, позволяющих оценить качество когнитивной модели, расчет матрицы транзитивного замыкания; построение

графов α -уровня для различных значений α ; анализ НКК на основе системных показателей и α -срезов.

Динамическое моделирование обеспечивает исследование динамики поведения слабоструктурированной и плохо формализуемой системы на основе модели импульсных процессов, представляющих собой воздействия на управляемые факторы когнитивной карты и анализ изменений значений целевых концептов (показателей функционирования исследуемой системы). В результате генерируются альтернативные векторы воздействий на управляемые концепты когнитивной карты, что позволяет выявить предпочтительный вариант альтернативы, задаваемый лицом, принимающим решения (ЛПР) в условиях заданных ограничений на ресурсы, необходимые для формирования импульсных воздействий.

Для обеспечения генерации альтернатив задаются начальные значения всех концептов когнитивной карты, проводится оценка характера изменения значений всех концептов, для анализа выбираются недоминируемые альтернативы. На основе результатов проведенного исследования формируются варианты предложений для ЛПР. Результатом когнитивного моделирования является выработка научно-обоснованных управляющих мероприятий с учетом поставленных целей и задач.

В настоящее время для моделирования слабоструктурированных и плохо формализуемых систем и процессов находят применение нечеткие когнитивные карты (НКК), в которых взаимосвязь между факторами представляется в виде нечетких переменных, что позволяет описать силу связей между концептами когнитивной карты качественными значениями. На рисунке 7 представлены разновидности НКК [3–5]:

- НКК В. Силова, в которых для обозначения взаимосвязи концептов используется в виде нечеткой матрицы смежности;
- нечеткие продукционные когнитивные карты, в которых взаимовлияние концептов описывается нечеткими продукционными правилами;
- обобщенные нечеткие продукционные когнитивные карты, позволяющие реализовать моделирование сложных систем путем использования расширенных возможностей по анализу когнитивных карт на основе продукционных правил;
- нечеткие реляционные когнитивные карты, обеспечивающие гибкость построения и анализа нечетких моделей слабоструктурированных систем на основе реляционного представления нечетких соотношений влияния между концептами;
- нейрософские реляционные карты, позволяющие использовать свойство тройственности логики (истина, ложь и неопределенность), обеспечивающее ее представление в 3D-нейрософском пространстве;

- динамические когнитивные сети, использующие для описания модели дифференциальные уравнения;
- гибридные НКК, использующие генетический алгоритм для обучения когнитивной карты.

В работах Борисова В.В. [26–27] класс нечетких когнитивных моделей на основе когнитивных карт расширен рядом новых моделей:

- совместимые НКК;
- нечеткие когнитивно-игровые модели;
- нечеткие коалиционные когнитивные модели;
- нечеткие нейросетевые когнитивные темпоральные модели;
- композиционные гибридные нечеткие модели.

Наибольшее распространение получили нечеткие когнитивные карты. Выбор нечеткой когнитивной карты обосновывается следующими причинами. Классические когнитивные карты не в полной мере обеспечивают построение адекватной и достоверной математической модели из-за высокого уровня неопределенности взаимодействия компонентов объекта исследования. Модели на основе классических когнитивных карт являются линейными и не обеспечивают возможность учета динамических свойств реальных систем, таких как нелинейность, нестационарность, неаддитивность и недетерминированность.

Основным преимуществом нечетких когнитивных моделей (НКМ) в сравнении с другими подходами является возможность формального описания неизмеримых факторов, представление взаимозависимостей между объектами и компонентами в виде нечетких отношений взаимовлияния с использованием методов нечеткой каузальной алгебры, а также использование неполной, нечеткой, в том числе противоречивой информации.

НКМ позволяет наилучшим образом отразить неопределенность, динамику, а также состояние концептов когнитивной карты и их взаимосвязей. Модель НКК позволяет описать поведение сложной системы в целом, а каждый концепт НКК — ее факторную характеристику.

В настоящее время на основе НКМ базируется большинство современных систем моделирования и прогнозирования сложных слабоструктурированных систем, отличающихся высокой степенью неопределенности и стохастичности, к классу которых относятся социальные системы, социально-экономические и организационно-технические системы и др.

В последнее время семейство НКМ существенно расширилось и дополнилось следующими классами НКК [8–11]: интервально-значные НКК, серые (интервальные) НКК, грубые НКК, интуиционистские НКК, динамические НКК.

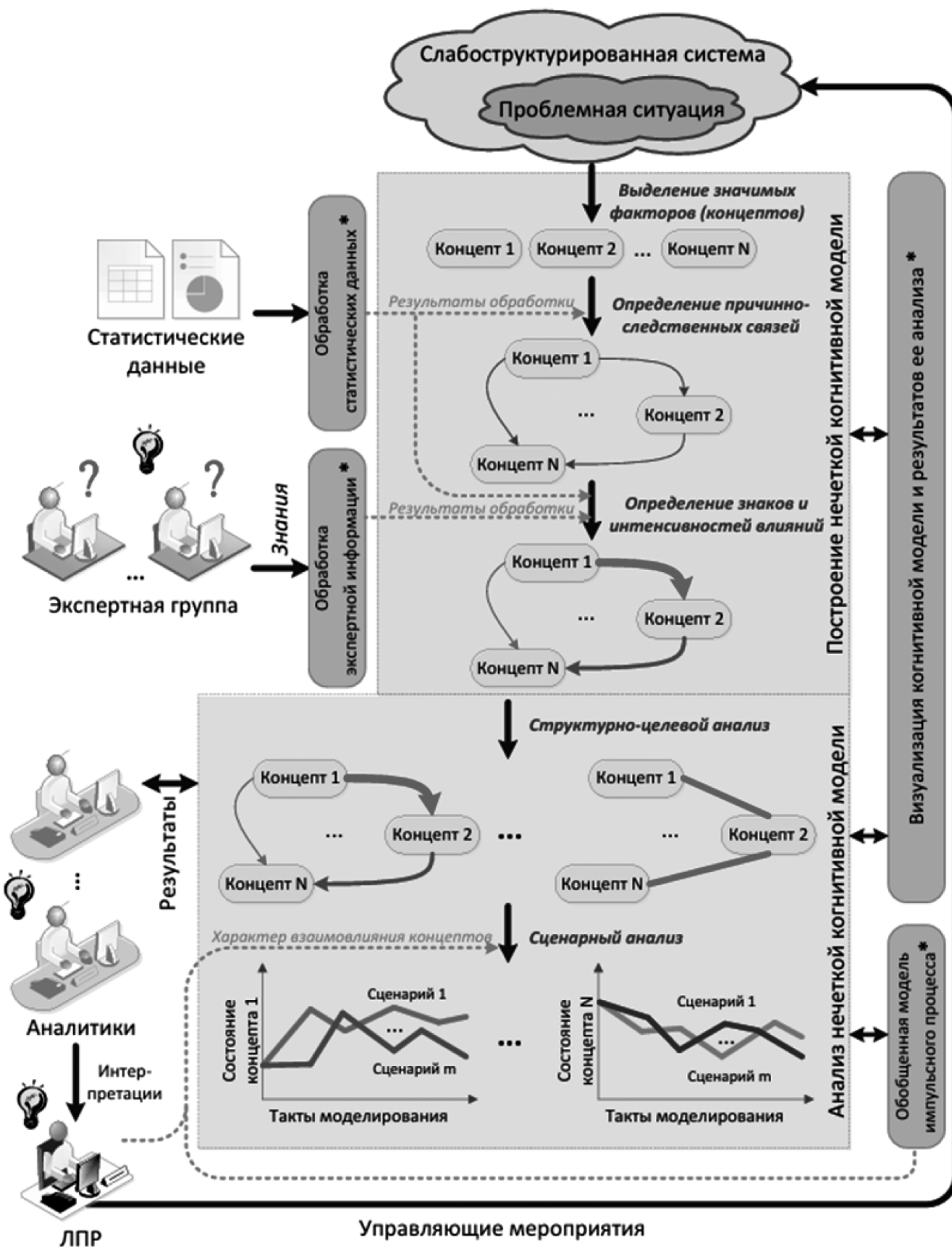


Рис. 6. Структурная схема процесса когнитивного моделирования слабоструктурированных и плохо формализуемых систем



Рис. 7. Классификация когнитивных карт

Они отличаются способами представления отношений между концептами, а также алгоритмами передачи управляющих воздействий от управляемых факторов к целевым показателям.

Сила связей между концептами НКК задается с помощью нечеткой лингвистической шкалы, представляющей собой упорядоченное множество лингвистических значений (термов) оценок силы связи. Использование нечетких когнитивных карт обеспечивает удобную интерпретацию причинно-следственных связей между концептами. Все это в совокупности обеспечивает построение адекватной модели объекта исследования [12].

Заключение

В настоящее время применение когнитивного моделирования является эффективным инструментом для анализа и моделирования сложных систем, которые трудно поддаются структуризации и количественной оценке. Такие системы, известные как слабоструктурированные и плохо формализуемые (СПФ-системы), характеризуются отсутствием четких количественных взаимосвязей между их элементами. Особенно ярко это проявляется в социально-экономических системах (СЭС), где человек выступает не только как управляемый элемент, но и как активная подсистема со своими целями и интересами, которые могут противоречить общим целям системы.

Проведенный обзор существующих источников выявил, что СПФ-системы отличаются тем, что их поведение и процессы невозможно адекватно описать с помощью количественных показателей и математических.

Таким образом, проведенный анализ показал отличительные особенности и возможности методов когнитивного моделирования для решения задач анализа функционирования и прогнозирования поведения слабоструктурированных и плохо формализуемых систем [13–14].

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеева З.К., Коврига С.В. Формирование стратегии развития социально-экономических объектов на основе когнитивных карт. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. — С. 184.
2. Исаев Р.А. Математическое обеспечение и информационная технология поддержки нечетких когнитивных моделей управления слабоструктурированными социально-экономическими системами: специальность 05.13.10 «Управление в социальных и экономических системах»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Исаев Руслан Александрович, 2021. — 178 с. — EDN TUONIC.
3. Авдеева З.К. Подход к постановке задач управления на когнитивной модели ситуации для стратегического мониторинга / З.К. Авдеева, С.В. Коврига // Управление большими системами. Выпуск 5. — 2016. — С. 120–146.
4. Васильев В.И. Интеллектуальные системы защиты информации: уч. пособие / В.И. Васильев // — М.: Машиностроение. — 2013. — 172с.
5. Кулинич А.А., Компьютерные системы моделирования когнитивных карт: подходы и методы / А.А. Кулинич // Пробл. управл., 2010, выпуск 3, 2–16.
6. Пылькин А.Н. Проектирование систем поддержки принятия решений для оценки состояния здоровья пациентов в условиях неопределенности / А.Н. Пылькин, А.В. Крошили, С.В. Крошили // Информатика и системы управления. — 2010. — №4(26). — С. 82–94. 152.

7. Борисов В.В. Нечеткие модели и сети / В.В. Борисов, В.В. Круглов, А.С. Федулов // 2-е изд. стереотип. Горячая линия — Телеком, Москва, Россия. — 2015. — 283с. 21.
8. Борисов В.В. Систематизация нечетких и гибридных нечетких моделей / В.В. Борисов // Нечеткие системы и мягкие вычисления, т.29. — №4. — 2020. — С. 100–116.
9. Федулов А.С. Нечеткие реляционные когнитивные карты / А.С. Федулов // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 2005. — №. 1. — С. 120–132., 141.
10. Espinosa M.L. Fuzzy Cognitive Maps with Rough Concepts / M.L. Espinosa, B. Depaire, K. Vanhoof // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI'2013). Paphos, Greece, Sept. 30 — Oct. 2. — 2013. — P. 527–536.
11. Hajec P., Interval-Valued Fuzzy Cognitive Maps for Supporting Business Decisions / P. Hajec, O. Prochazka // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Fuzzy Systems. Vancouver, BC, Canada. —2016. — P. 531–536.
12. Papageorgiou E.I. Intuitionistic Fuzzy Cognitive Maps / E.I. Papageorgiou D.K. Iakovidis // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. — Vol. 21. — No. 2 — 2013. — P. 342–354
13. Суздальский Д.А. Применение нечетких когнитивных карт в условиях принятия решений для обеспечения информационной безопасности / Д.А. Суздальский // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2024. — № 3. — С. 113–117. — DOI 10.37882/2223–2966.2024.03.33. — EDN GZDKL.
14. Суздальский Д.А. Оптимизация оценки риска для поддержки принятия решений с использованием интеллектуальной модели, основанной на нечетких логических выводах возобновляемых правил / Д.А. Суздальский // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2024. — № 6. — С. 121–127. — DOI 10.37882/2223–2966.2024.06.36. — EDN DEIZSW.

© Суздальский Дмитрий Андреевич (ya.jummer@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОПИСАНИЕ РЕЖИМОВ АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛЬНО-КОДОВОЙ КОНСТРУКЦИИ В ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РАДИОКАНАЛА СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

DESCRIPTION OF THE MODES OF THE ALGORITHM FOR ESTIMATING THE PARAMETERS OF THE SIGNAL-CODE STRUCTURE IN THE SIMULATION MODEL OF A SATELLITE RADIO CHANNEL

**A. Tarasov
A. Kovalchuk**

Summary. Space systems integrate all input and output components capable of forming a communication module. They are located in the ground segment of the operations center and in the space segment on board the satellite. This, in turn, enables the control of space operations and other systems that support data distribution for applications. Since space missions collect huge amounts of scientific data, measurements, and images, high-speed transmission is of great importance. Issues related to information loss, interference during transmission, and the volume of data packets (frames) that can be sent deserve special attention. Given this, the requirements for the reliability of a single symbol during transmission are increasing significantly. In recent years, intensive research has been conducted to solve the problems of ensuring accurate transmission of information without distortion and to eliminate various types of interference in satellite communication systems. This research is based on the principle of creating command and measurement systems. Based on this principle, a new algorithm is being developed for evaluating signal parameters in the radio link of a command and measurement system, which allows selecting a particular radio link channel by first analyzing the interference environment not only at different speeds, but also using different coding methods for both received and transmitted data. During the research, various operating modes of the receiver were formalized, which supports the parallel operation of several channels using different signal-code structures, which allows for a wide range of data transmission speeds. Based on the results of modeling various modes of transmitter operation, it was found that the results obtained are consistent with the capabilities of using an adaptive data reception and transmission algorithm that supports automatic channel selection based on the data coding method and speed. It has been shown that the use of this method of information exchange between ground equipment and onboard equipment using a transmission speed selection algorithm, as well as various signal-code structures, provides not only significant time savings, but also a significant gain in the reliability of received and transmitted data compared to the traditional method, in which speeds are switched by commands in complex interference conditions.

Keywords: receiver, transmitter, information exchange methods, signal-code structures, radio link, ratio of useful signal to interference, command and measurement systems.

Тарасов Алексей Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент,
ФГОУ ВО Московский государственный
технологический университет «Станкин»
amlang@mail.ru

Ковальчук Антон Сергеевич

аспирант, ФГОУ ВО Московский государственный
технологический университет «Станкин»
tolstakoala@yandex.ru

Аннотация. Космические системы объединяют все компоненты входа и выхода, способные формировать коммуникационный модуль. Они находятся в наземном сегменте операционного центра и в космическом сегменте на борту спутника. Что в свою очередь позволяет управлять космическими операциями и другими системами, которые поддерживают распространение данных для приложений. Поскольку космические миссии собирают огромные объемы научных сведений, измерений и изображений, высокоскоростная передача имеет большое значение. Отдельного внимания заслуживают вопросы, связанные с потерей информации, помехами, возникающими в процессе передачи, и объемом пакетов данных (кадров), которые могут пересланы. С учетом отмеченного, существенным образом возрастают требования к достоверности единичного символа в процессе передачи. В последние годы интенсивно проводятся исследования, нацеленные на решение проблем обеспечения точности передачи информации без ее искажения и нивелирование различного рода помех в системах спутниковой связи. Эти исследования основаны на принципе создания командно-измерительных систем. На основе этого принципа разрабатывается новый алгоритм оценки параметров сигнала в радиолинии командно-измерительной системы, который позволяет выбирать тот или иной канал радиолинии, предварительно анализируя помеховую обстановку не только на различных скоростях, но и используя различные методы кодирования как принимаемых, так и передаваемых данных. В процессе исследования формализованы различные режимы работы приемника, который поддерживает параллельную работу нескольких каналов, используя при этом различные сигнально-кодовые конструкции, что позволяет обеспечивать широкий спектр скоростей передачи данных. По итогам моделирования различных режимов работы передатчика было установлено, что полученные результаты согласуются с возможностями использования адаптивного алгоритма приема и передачи данных, который поддерживает автоматический выбор канала по способу кодирования и скорости. Показано, что применение такого метода обмена информацией между наземной аппаратурой и бортовой с использованием алгоритма выбора скорости передачи, а также различных сигнально-кодовых конструкций, обеспечивает не только значительный выигрыш во времени, но и существенный выигрыш в достоверности принимаемых и передаваемых данных по сравнению с традиционным методом, в котором скорости в условиях сложной помеховой обстановки переключаются командами.

Ключевые слова: приёмник, передатчик, методы обмена информацией, сигнально-кодовые конструкции, радиолиния, отношение полезного сигнала к помехе, командно-измерительные системы.

Введение

В современном мире ни один информационный обмен между элементами космической системы не обходится без различного рода помех. В случае воздействия большого количества помех может существенно упасть скорость обмена данными в радиолинии, а также исказиться и сама информация.

Ежегодно спутниковая отрасль выделяет значительные средства на прогнозирование, мониторинг и устранение известных помех, возникающих при передаче информации. Для предотвращения и устранения помех применяется множество методов, начиная с усовершенствованных схем коррекции ошибок, таких как LDPC, регулирования уровня реактивной мощности в неблагоприятных погодных условиях, регулирования скорости передачи символов и резервного спутникового соединения, и заканчивая многими другими.

Но, как правило, «можно быть хорошо подготовленным только к известным событиям». Неожиданное ухудшение качества связи и помехи по-прежнему возникают из-за местных погодных условий, неопределенной мощности радиочастотного излучения, недобросовестных операторов и неисправных соседних устройств, которые могут вызвать непредсказуемые искажения и шумы. Одним из таких примеров является нескоординированное тестирование приложений передачи 5G вблизи земной станции без надлежащего уведомления операторов станции. После этого техническая команда земной станции должна диагностировать проблему, произвести соответствующие настройки или переждать помехи до тех пор, пока событие не пройдет. В течение всего времени действия помех зрители могут наблюдать артефакты, микро- и макроблокировку, зависание кадров и полную потерю сигнала.

Однотонная гармоническая помеха может быть нивелирована в рамках сравнительно узкого диапазона частот. При этом полезная информация в полной мере восстанавливается на «незатронутых» участках спектра. Любая помеха, которая сосредоточена в спектре на выходе корреляционного приёмника трансформируется в широкополосную благодаря псевдошумовым сигналам, что позволяет обеспечить ее активное подавление.

Как известно, в условиях наличия помех, эффективная работа приемника определяется скоростью передачи данных, типом сигнально-кодовой конструкции, а также методами, которые применяются для обработки сигнала в приёмнике. В этой статье мы рассмотрим, как влияют различные методы кодирования при приёме и передаче данных в условиях возникновения помех, сформируем различные режимы, которые лягут в основу разработки алгоритма оценки параметров сигнально-кодовой конструкции.

Используемые в современных космических миссиях командно-измерительные системы (КИС), все в большей степени опираются на псевдошумовые сигналы [2]. Псевдошумовые сигналы генерирует двоичную последовательность, которая выглядит случайной, но остается детерминированной и повторяемой. Системы спутниковой навигации, такие как GPS, Galileo и BeiDou, а также различные коммуникационные приложения, полагаются на эти коды. Псевдошумовые сигналы обладают ключевыми характеристиками, которые делают их незаменимыми для навигации и связи. Они следуют детерминированному шаблону, поскольку генерируются алгоритмами, что обеспечивает точное воспроизведение. Несмотря на свою структурированную конструкцию, они обладают статистическими свойствами, схожими с белым шумом, что делает их случайными.

Используя указанные характеристики и принципы, в рамках проводимого исследования планируется разработать алгоритм адаптации в имитационной модели радиолинии КИС. Предполагается, что этот алгоритм, в зависимости от помеховой обстановки, даст возможность выбирать наиболее оптимальный и приемлемый информационный канал с учетом анализа параметра отношения сигнала к шуму не только на различных скоростях, но и с использованием различных сигнально-кодowych конструкций. Подключение каналов будет происходить автоматически, что весьма актуально для управления низкоорбитальными КА.

Описание режимов

В целях предотвращения влияния помех на передаваемую с Земли и получаемую информацию с БА в алгоритме оценки параметров сигнально-кодовой конструкции в имитационной модели радиоканала спутниковой связи предусмотрено 3 режима.

1 режим предполагает использование классического алгоритма передачи данных в радиолинии с автоматическим изменением скорости передачи данных без использования сигнально-кодowych конструкций.

В таком случае корректность сообщения определяется сравнением полученной 16-битной контрольной суммы, идущей в конце каждой КПИ, с посчитанной. В случае совпадения контрольной суммы бортовая аппаратура отправляет на Землю обратное сообщение о выполнении той или иной КПИ-квитанции. Если квитанция не пришла за 1 секунду, то считается, что сообщение не было получено бортовой аппаратурой и передатчик автоматически уменьшает свою скорость. Более подробно алгоритм, а также логика переключения между режимами будут описаны в следующей статье.

2 режим предполагает использование кодирования Хэмминга. Вся информация, передаваемая с Земли,

перед отправкой делится на блоки разрядностью n бит (в том числе и контрольная сумма). Каждый блок называется кодовым словом (КС). КС, в свою очередь, состоит из данных, состоящих из $n-m$ бит и синдрома, состоящего из m бит. Каждый бит синдрома контролирует определённый бит данных. Для того, чтобы определить, какими битами синдрома контролируется нужный нам бит, необходимо разложить номер бита данных по степеням числа 2. В случае возникновения помех при передаче информации приёмник способен исправить единичную ошибку. Если после декодирования данных контрольная сумма совпала, то БА также отправляет квитанцию на Землю. Если в течение 1 секунды квитанция на Землю не пришла, НА автоматически понижает скорость.

Необходимое условие автокоррекции задаёт соотношение n и m [3]:

$$2^m \geq n + 1 \quad (1)$$

Тогда эффективность передачи данных с помощью такого кода равна:

$$\text{КПД: } \frac{\text{данные}}{\text{всё КС}} = \frac{n-m}{n} = 1 - \frac{m}{n} \quad (2)$$

Любая физическая линия связи (ЛС) характеризуется определённым уровнем сигнал/шум, потенциально способного исказить любые разряды сообщения [3]. При построении модели были сделаны два допущения:

1. Уровень шума $p = \text{const}$ (вероятность искажения одного разряда);
2. Одиночные помехи распределены случайно

В этом случае мы сможем оценить не только эффективность (2), заданную самим КС, но и воспользоваться классическим определением вероятности [3]. Таким образом, формула оценки эффективности кода приобретает следующий вид:

$$\eta = \eta_{\text{КС}} P_{\text{без повторной передачи}} = \text{КПД: } \frac{n-m}{n} (P_{\text{без ошибок}} + P_{\text{с 1 ошибкой}}) \quad (3)$$

Правая часть формулы является КПД при идеальной линии с отсутствием шума, левая часть — учитывает только благоприятные вероятности, когда в КС не произошло ошибок, или произошла всего 1 ошибка, которую можно сразу исправить. В остальных случаях придется запрашивать повторную пересылку данных.

Из данной формулы следует, что КПД при передаче информации с использованием кодов Хэмминга выше, чем при использовании классического алгоритма передачи данных.

3 режим предполагает использование кодов Рида-Соломона. Коды Рида-Соломона работают над конечны-

ми полями, что означает, что все операции выполняются с элементами поля $\mathbf{GF}(2^m)$, где m — целое число.

Подобно второму режиму, данные перед отправкой разбиваются на блоки, каждый из которых представляет собой элемент конечного поля. К исходным данным добавляются контрольные символы. Число добавленных символов определяет способность кода исправлять ошибки. Например, код $RS(n, k)$ имеет n символов в кодовом слове, из которых k — это количество символов исходных данных, а $n-k$ — **синдром**.

Необходимое условие автокоррекции имеет следующий вид:

$$t = \frac{n-k}{2} \quad (4)$$

Где n — всё КС, а k — количество символов исходных данных, t — максимальное число ошибок, которое может исправить код. КПД будет вычисляться аналогично формуле (2).

$$\text{КПД: } \frac{\text{данные}}{\text{всё КС}} = \frac{n-k}{n} = 1 - \frac{k}{n} \quad (5)$$

В свою очередь, формула оценки эффективности применения кодов Рида-Соломона будет равна:

$$\eta = \eta_{\text{КС}} P_{\text{без повторной передачи}} = \text{КПД: } \frac{n-k}{n} (P_{\text{без ошибок}} + P_{\text{с } t \text{ ошибками}}) \quad (6)$$

Итак, поскольку коды Рида-Соломона способны исправлять большее количество ошибок по сравнению с кодами Хэмминга, вероятность того, что сообщение с Земли дойдёт с первой попытки выше. А, следовательно, коды Рида-Соломона наиболее надёжны для использования в условиях плохого соотношения сигнал\шум.

Экспериментальная часть

Согласно рекомендациям CCSDS [6], структура передаваемой информации выглядит следующим образом: вначале идёт **стартовая последовательность**, состоящая из 31 символа, далее идут **закодированные данные**, имеющие динамическую длину, последней передаётся **завершающая последовательность**, которая, как правило, содержит в себе контрольную сумму. По завершающей последовательности модель командно-измерительной системы принимает решение о правильности принятого массива.

Как было упомянуто выше, каждому блоку КПИ предшествует некая стартовая последовательность, которая передаётся с той же скоростью, что и информация. В качестве примера выберем последовательность максимально возможной длины (М-последовательность) длиной 31 символ с соответствующим порождающим полиномом 5-й степени и сравним время, за которое

эта последовательность передаётся на разных скоростях в разных режимах предлагаемой системы, и время, за которое эта последовательность передаётся в уже использующихся системах.

На таблице 1 представлен пример М-последовательности. Стоит отметить, что эта последовательность выбрана неслучайно, так как впоследствии предполагается, что решение о выборе канала и, следовательно, переключение используемого кодирования, а также смена скорости передачи информации будет при надобности происходить именно после передачи стартовой последовательности.

С помощью программы, написанной на языке программирования Python, была составлена модель, кото-

Таблица 1.

М-последовательность

М-последовательность	Порождаемый полином $h(x)$
1001000010101110110001111100110	$h(x) = x^5 + x^2 + 1$

рая учитывает вероятность ошибки и время передачи данных для разных скоростей. Результаты моделирования представлены на рисунках 1 и 2.

Из рисунков следует, что использование систем с кодами автокоррекции обеспечивает существенный выигрыш во времени за счёт минимизации вероятности ошибки при передаче во время неудовлетворительной помеховой обстановки.

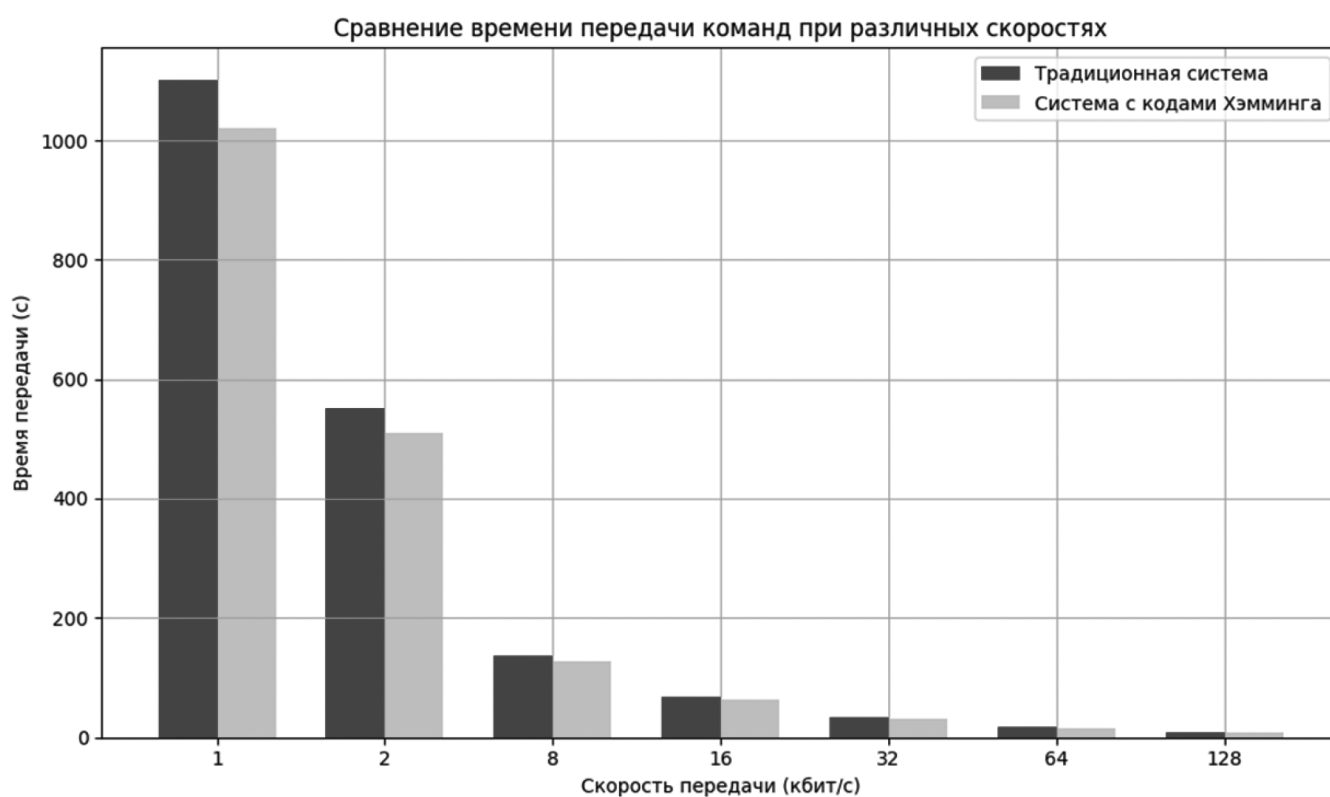


Рис. 1. Результаты моделирования системы с использованием кодов Хэмминга

ЛИТЕРАТУРА

1. Невдяев Л. CDMA: Борьба с помехами // Сети/Network world: электронный журнал. 2000. №10. <https://www.osp.ru/nets/2000/10/141420> (дата обращения 15.05.2025)
2. Формирование обобщённых данных. Экспериментальная спецификация CCSDS 551.1-0-1 // Научные разработки и исследования в области стандартов космических систем связи. Оранжевая книга. 2015, вып. 1. 48 с. [https://public.ccsds.org/Pubs/551x1o1e1\(R\).pdf](https://public.ccsds.org/Pubs/551x1o1e1(R).pdf) (дата обращения 17.05.2025)
3. Тарасов А.Г., Алгоритм выбора оптимальной длины слова помехоустойчивого кода при передаче данных по линии связи с постоянным уровнем шума/ X-ая научная конференция МГТУ «СТАНКИН» Учебно-научного центра Математического моделирования МГТУ «СТАНКИН» — ИММ РАН. Программа, Сборник докладов. М.: Янус-К ИЦ ГОУ МГТУ «СТАНКИН», 2007 г., стр.68–70 (дата обращения 18.05.2025)
4. Мальцев Г.Н., Травкин В.С. Оптимальный приём сложных фазоманипулированных сигналов в спутниковых радиоканалах в условиях внутрисистемных структурных помех// Информационно управляющие системы, 2006, №5(24). С.36–42. (дата обращения 19.05.2025)
5. Telecommand Part 1 Channel service. Recommendation for Space Data System Standards CCSDS 201.0-B3. Текст: электронный // Blue Book. Washington, DC: CCSDS. 2000. 42 p. <https://public.ccsds.org/Pubs/201x0b3s.pdf> (дата обращения 21.05.2025)

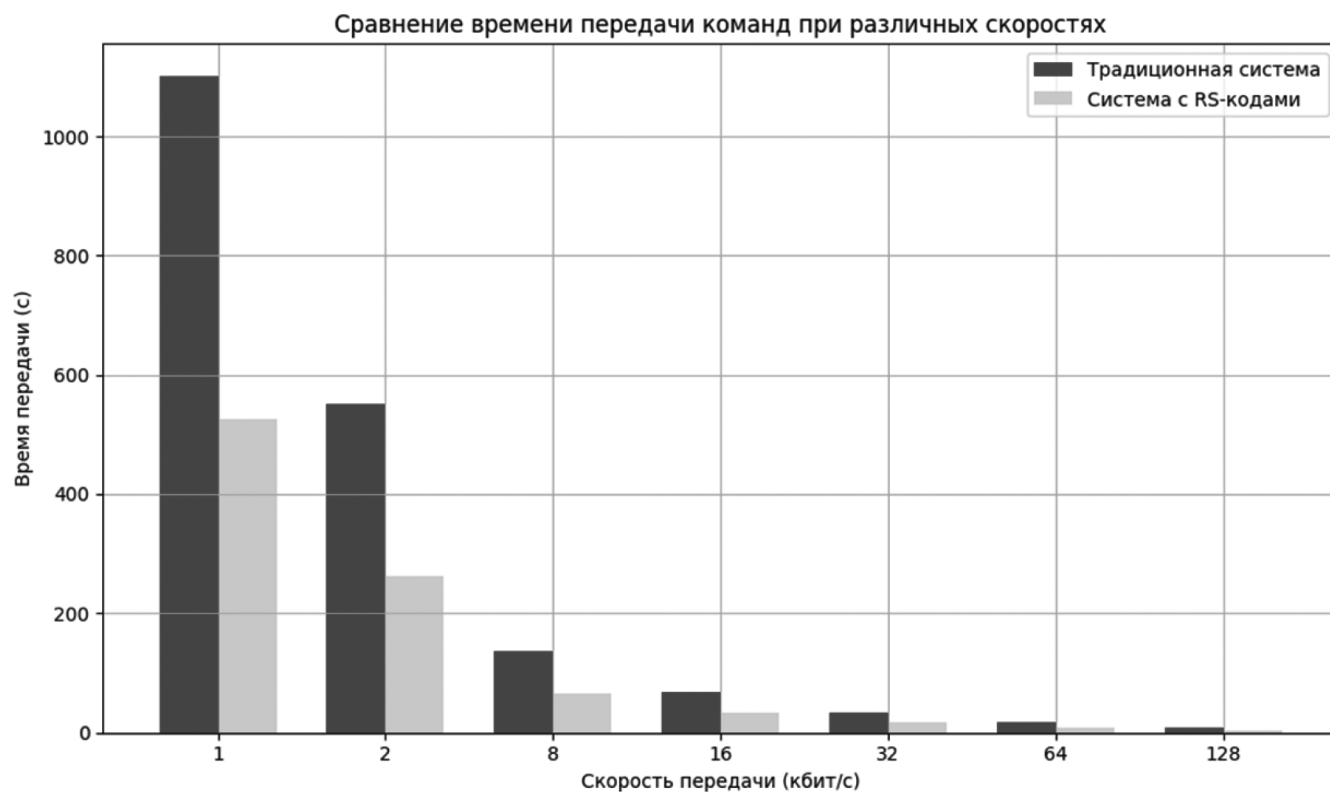


Рис. 2. Результаты моделирования системы с использованием кодов Рида-Соломона

6. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с (дата обращения 25.05.2024)
7. Бортовая аппаратура командно-измерительной системы для космических аппаратов ГЛОНАСС: результаты эксплуатации и перспективы развития/ Н.Н. Булгаков, В.Г. Глыбин, А.А. Кривошеин, А.С. Семочкин, журнал «Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы», 2014, том 1, выпуск 2, с.65–73. (дата обращения 27.05.2024)
8. Методы управляемого разнесённого приёма данных телеизмерений / Воронцов В.Л., журнал «Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы», 2019, том 6, выпуск 4, с. 66–74 (дата обращения 27.05.2024)

© Тарасов Алексей Геннадьевич (amlang@mail.ru); Ковальчук Антон Сергеевич (tolstakoala@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СИСТЕМА АНАЛИЗА И ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ИНТЕГРАЦИЕЙ С LIDAR И ВСЕНАПРАВЛЕННЫМИ КАМЕРАМИ

OBJECT DETECTION AND ANALYSIS SYSTEM USING NEURAL NETWORKS AND INTEGRATION WITH LIDAR AND OMNIDIRECTIONAL CAMERAS

**S. Trushin
E. Petrunov
K. Shmakov**

Summary. The article is devoted to the analysis of the object detection system based on neural networks with the integration of LiDAR and omnidirectional cameras. Particular attention is paid to the technological aspects, system architecture and its application in civil defense and the civilian sphere. The purpose of the study is to consider the benefits and challenges associated with the implementation of these technologies, as well as the prospects for their development. The work uses methods of analysis of modern research, system design and comparative evaluation of technologies. The results show that the combination of neural networks, LiDAR and 360-degree cameras significantly improves the accuracy and speed of object detection, which is relevant for security, transport and environmental monitoring. The findings highlight the need to address ethical and technical issues for further development of the technology.

Keywords: neural networks, lidar systems, panoramic cameras, object detection, sensor integration, computer vision, real-time data processing, autonomous systems, artificial intelligence, multimodal perception.

Трушин Степан Михайлович

старший преподаватель, МИРЭА — Российский
технологический университет, г. Москва
trushin@mirea.ru

Петрунев Егор Алексеевич

МИРЭА — Российский технологический
университет, г. Москва
petrunov@mirea.ru

Шмаков Кирилл Алексеевич

МИРЭА — Российский технологический
университет, г. Москва
shmakov@mirea.ru

Аннотация. Статья посвящена анализу системы обнаружения объектов на основе нейронных сетей с интеграцией LiDAR и всенаправленных камер. Особое внимание уделяется технологическим аспектам, архитектуре системы и её применению в гражданской обороне и гражданской сфере. Цель исследования — рассмотреть преимущества и вызовы, связанные с внедрением данных технологий, а также перспективы их развития. В работе использованы методы анализа современных исследований, системного проектирования и сравнительной оценки технологий. Результаты показывают, что комбинация нейронных сетей, LiDAR и 360-градусных камер значительно повышает точность и скорость обнаружения объектов, что актуально для безопасности, транспорта и экологического мониторинга. Выводы подчеркивают необходимость решения этических и технических проблем для дальнейшего развития технологии.

Ключевые слова: нейронные сети, лидарные системы, панорамные камеры, обнаружение объектов, сенсорная интеграция, компьютерное зрение, обработка данных в реальном времени, автономные системы, искусственный интеллект, мультимодальное восприятие.

Введение

Современный этап технологического развития характеризуется стремительным ростом возможностей систем автоматизированного восприятия окружающей среды. В условиях экспоненциального увеличения объемов данных и ужесточения требований к точности и скорости обработки информации особую актуальность приобретают интегрированные системы обнаружения объектов, сочетающие преимущества различных сенсорных технологий и методов машинного обучения [1].

Актуальность темы исследования обусловлена несколькими ключевыми факторами. Во-первых, тради-

ционные системы компьютерного зрения, основанные исключительно на обработке двумерных изображений, демонстрируют ограниченную эффективность в сложных условиях освещения и при наличии визуальных помех [2]. Во-вторых, требования к системам безопасности и автономного управления постоянно ужесточаются, что вызывает необходимость разработки более надежных и точных решений [3]. В-третьих, развитие технологий интернета вещей и концепции «умных городов» создает спрос на интеллектуальные системы мониторинга, способные обрабатывать информацию в реальном времени [4].

Основная научная проблема, рассматриваемая в данной работе, заключается в необходимости разработки

методов эффективной интеграции данных от различных сенсоров (лидаров, панорамных камер) с использованием современных архитектур нейронных сетей для создания надежных систем обнаружения объектов. Особое внимание уделяется вопросам обеспечения высокой точности при работе в реальном времени и адаптивности к изменяющимся условиям окружающей среды.

Целью исследования является комплексный анализ современных подходов к построению интегрированных систем обнаружения объектов и выявление перспективных направлений их совершенствования. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Провести сравнительный анализ существующих технологий обнаружения объектов
2. Исследовать методы интеграции данных от лидаров и панорамных камер
3. Проанализировать современные архитектуры нейронных сетей для обработки мультимодальных данных
4. Оценить эффективность предложенных решений в различных предметных областях
5. Выявить основные технические и этические проблемы внедрения подобных систем

Методология исследования включает:

- Системный анализ современных технологий обнаружения объектов
- Экспериментальное исследование точности различных алгоритмов обработки данных
- Моделирование процессов сенсорной интеграции
- Сравнительную оценку производительности различных архитектур нейронных сетей

Научная новизна работы заключается в:

1. Разработке классификации методов интеграции данных от лидаров и панорамных камер
2. Анализе влияния различных факторов на точность обнаружения объектов
3. Предложении модифицированной архитектуры нейронной сети для обработки мультимодальных данных

Практическая значимость исследования определяется возможностью применения полученных результатов в различных областях:

- Системах безопасности и видеонаблюдения
- Автономном транспорте и системах помощи водителю
- Промышленной автоматизации и робототехнике
- Экологическом мониторинге и управлении городской инфраструктурой

Структура статьи организована следующим образом. В первом разделе рассматриваются современные техно-

логии обнаружения объектов. Второй раздел посвящен анализу архитектурных решений интегрированных систем. Третий раздел освещает вопросы применения таких систем в гражданской обороне. Четвертый раздел рассматривает гражданские применения. Пятый раздел анализирует проблемы и вызовы. Шестой раздел посвящен перспективам развития технологий. В заключении подводятся итоги исследования.

Современные технологии обнаружения объектов

Современные системы обнаружения объектов представляют собой сложные программно-аппаратные комплексы, сочетающие различные технологии восприятия окружающей среды. Основными компонентами таких систем являются:

1. **Оптические сенсоры** (камеры различного типа).
2. **Активные дальноммерные системы** (лидары, радары).
3. **Вычислительные модули** для обработки данных.
4. **Алгоритмы машинного обучения** для анализа информации.

Среди оптических сенсоров особое место занимают панорамные (360°) камеры, которые обеспечивают полный обзор окружающего пространства без «мертвых зон». Современные модели таких камер способны обеспечивать разрешение до 8K при частоте кадров 60 fps, что позволяет получать детализированное изображение всей окружающей обстановки [5].

Лидарные системы, основанные на принципе измерения времени пролета лазерного импульса (ToF — Time of Flight), обеспечивают точное трехмерное представление пространства. Современные твердотельные лидары способны формировать до 300 000 точек в секунду с точностью измерения расстояния до 2 мм [6].

Архитектура интегрированных систем

Разработка эффективной архитектуры интегрированной системы обнаружения объектов требует решения нескольких ключевых задач:



Рис. 1. Робот-доставщик Яндекса с лидаром

Синергия данных. LiDAR предоставляет высокоточные данные о расстоянии и форме объектов, в то время

как 360-градусные камеры обеспечивают визуальную информацию. Сочетание этих данных позволяет создавать более информативные и полные 3D-модели окружающей среды.

Устойчивость к условиям освещения. Локатор работает эффективно в условиях низкой освещенности и даже в полной темноте, в то время как камеры могут испытывать трудности при недостатке света. Использование обеих технологий позволяет обеспечить надежную работу в различных условиях.

Улучшение распознавания объектов. Система световой идентификации может помочь в точной локализации объектов, а всенаправленные камеры могут предоставить визуальные данные для их классификации. Это особенно важно для автономных транспортных средств, где требуется высокая точность и надежность.

Обогащение данных для машинного обучения. Совместное использование данных от LiDAR и всенаправленных камер может улучшить обучение моделей машинного обучения, позволяя им лучше распознавать объекты и их характеристики.

Повышение безопасности. В системах видеонаблюдения сочетание локатора и камер может улучшить обнаружение и идентификацию подозрительных объектов или действий, что способствует повышению уровня безопасности.



Рис. 2. Пример сбора данных при проезде перекрёстка

Современные подходы к построению архитектуры таких систем можно классифицировать следующим образом:

1. **Централизованная архитектура** — все данные обрабатываются единым вычислительным модулем.
2. **Распределенная архитектура** — каждый сенсор имеет собственный модуль предварительной обработки.
3. **Гибридная архитектура** — комбинация централизованного и распределенного подходов.

Экспериментальные исследования показывают, что гибридная архитектура демонстрирует наилучшие показатели по соотношению «точность/производительность» [7].

Применение в гражданской обороне

В области гражданской обороны интегрированные системы обнаружения объектов находят применение в следующих задачах:

1. Мониторинг критической инфраструктуры.
2. Обнаружение несанкционированных объектов (дроны, подозрительные предметы).
3. Контроль периметра охраняемых зон.
4. Координация действий служб быстрого реагирования.

LiDAR и всенаправленные камеры, играют ключевую роль в обеспечении безопасности и эффективности операций в сфере гражданской обороны. Эти технологии позволяют осуществлять мониторинг, обнаружение и реагирование на угрозы в реальном времени, что критически важно для защиты населения и инфраструктуры. В данной главе мы рассмотрим примеры использования для раннего обнаружения объектов и их влияние на эффективность операций и безопасность.



Рис. 3. Пример сканирования местности для создания объёмной карты

Примеры использования для раннего обнаружения объектов (дронов, техники, пехоты)

Раннее обнаружение дронов. В условиях современных конфликтов и террористических угроз дроны стали распространенным инструментом для разведки и нападения. Интеграция LiDAR и камер позволяет создать системы, способные обнаруживать дроны на ранних стадиях их появления. LiDAR, благодаря своей способности точно измерять расстояние и создавать 3D-карты местности, может выявлять малые объекты, какими и являются дроны, которые могут быть не видны на обычных камерах. Системы, использующие машинное обучение, могут анализировать данные в реальном времени, быстро распознавая типы дронов и их поведение, что позволяет принимать быстрые меры для нейтрализации угрозы.

Обнаружение техники. Военные и гражданские операции часто требуют мониторинга перемещения техники (танки, бронетранспортеры и другие транспортные средства). Системы, использующие LiDAR, могут эффективно отслеживать движение техники в сложных условиях, например, густые леса или городская застройка, где традиционные методы наблюдения могут оказаться неэффективными. LiDAR создает детальные 3D-модели местности, что позволяет оперативно выявлять изменения в ландшафте, вызванные движением техники, и определять их местоположение.



Рис. 4. Отсканированная местность через лидар

Обнаружение пехоты в сложных условиях представляет собой серьезную задачу. Технологии, основанные на LiDAR и всенаправленных камерах, могут быть использованы для создания систем, способных распознавать человеческие фигуры и их поведение в реальном времени. Модели машинного обучения могут обучаться на больших объемах данных, чтобы различать пехоту от других объектов: деревья или здания. Это позволяет военным и службам гражданской обороны заранее идентифицировать потенциальные угрозы и принимать меры для защиты.

Как система может повысить эффективность операций и безопасность

Интеграция вышеописанных технологий в сферу гражданской обороны и военных операций открывает новые горизонты для повышения эффективности и безопасности. Рассмотрим более подробно, как эти системы могут улучшить различные аспекты операций.

Системы, использующие LiDAR и всенаправленные камеры, обеспечивают полное и детальное представление о текущей ситуации на поле боя или в зоне действия. Они способны создавать трехмерные карты местности в реальном времени, что позволяет командирам и оперативным группам видеть не только расположение объектов, но и их поведение. Это значительно улучшает ситуационную осведомленность, позволяя быстро реагировать на изменения обстановки и минимизировать риски.

Автоматизация мониторинга с использованием LiDAR и камер 360 градусов позволяет значительно сократить

время, необходимое для анализа ситуации. Алгоритмы машинного обучения могут обрабатывать большие объемы данных, выявляя паттерны и аномалии, которые могут указывать на потенциальные угрозы. Это позволяет службам гражданской обороны сосредоточиться на более критических задачах, освобождая ресурсы и увеличивая общую эффективность операций.

Быстрое обнаружение угроз и автоматическая передача информации в командные центры позволяют значительно сократить время реакции на инциденты. В экстренных ситуациях (террористические атаки) каждая секунда имеет значение. Вышеописанные системы способны мгновенно идентифицировать угрозы и передавать данные, что позволяет оперативно принимать меры и спасать жизни.

Использование технологий для раннего обнаружения угроз значительно повышает безопасность сотрудников служб гражданской обороны. Они могут заранее предупреждать о потенциальных угрозах, позволяя персоналу избегать опасных ситуаций. Это особенно важно в условиях боевых действий или при управлении чрезвычайными ситуациями, где риски для жизни высоки. Снижение необходимости в прямом контакте с угрозами также позволяет уменьшить психологическое давление на сотрудников.

Информация, полученная от систем LiDAR и всенаправленных камер, позволяет лучше планировать и распределять ресурсы. Команды могут быть направлены в наиболее критические зоны, основываясь на реальных данных о ситуации. Это не только повышает эффективность операций, но и экономит время и средства, что особенно важно в условиях ограниченных ресурсов.

Данные системы могут быть интегрированы с другими технологиями, такими как дроны, спутниковые системы и базы данных. Это создает единую информационную экосистему, которая позволяет службам гражданской обороны и военным эффективно обмениваться данными и координировать свои действия. Интеграция различных источников информации обеспечивает более полное представление о ситуации и способствует более быстрому принятию решений.

Технологии LiDAR и всенаправленных камер могут использоваться не только в реальных операциях, но и для обучения и подготовки персонала. Создание симуляций на основе данных, полученных от этих систем, позволяет обучать сотрудников реагированию на различные сценарии, что повышает их готовность к реальным ситуациям. Это также способствует улучшению командной работы и взаимодействия между различными службами.

Особенностью применения в данной сфере являются:

- Повышенные требования к надежности.
- Необходимость работы в экстремальных условиях.
- Высокие требования к времени реакции системы.

Гражданские применения

В гражданской сфере интегрированные системы обнаружения объектов применяются в:

- Автономном транспорте
- Умных системах видеонаблюдения
- Промышленной автоматизации
- Робототехнике
- Системах дополненной реальности

Раннее обнаружение объектов играет критическую роль в различных отраслях, обеспечивая безопасность, эффективность и надежность процессов. В сфере безопасности, например использование технологий, таких как LiDAR и 360-градусных камер, в сочетании с нейронными сетями, позволяет создавать интеллектуальные системы мониторинга, которые способны выявлять подозрительное поведение или аномалии в реальном времени. Таким образом, системы раннего обнаружения могут предотвратить преступления и террористические акты, позволяя правоохранительным органам реагировать на угрозы до того, как они перерастут в серьезные инциденты.

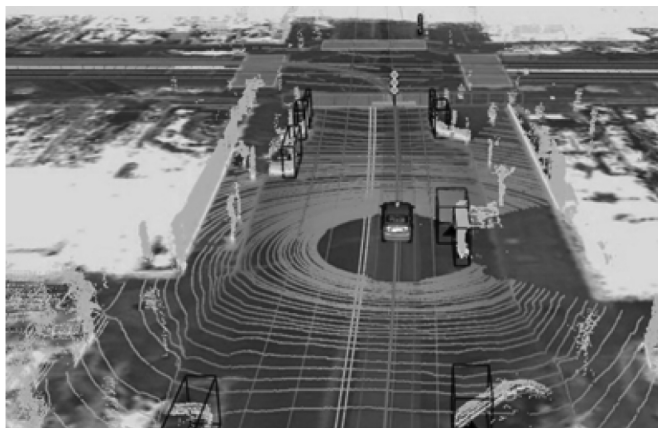


Рис. 5. Карта 360, сформированная с помощью датчиков на автомобиле

В области транспорта раннее обнаружение может существенно снизить количество аварий и улучшить управление движением. Например, вышеописанные системы, могут предсказывать поведение других участников дорожного движения и автоматически реагировать на потенциальные опасные ситуации, такие как внезапное движение пешеходов или другие транспортные средства.

Экологический мониторинг также выигрывает от раннего обнаружения объектов. Системы, способные идентифицировать изменения в окружающей среде,

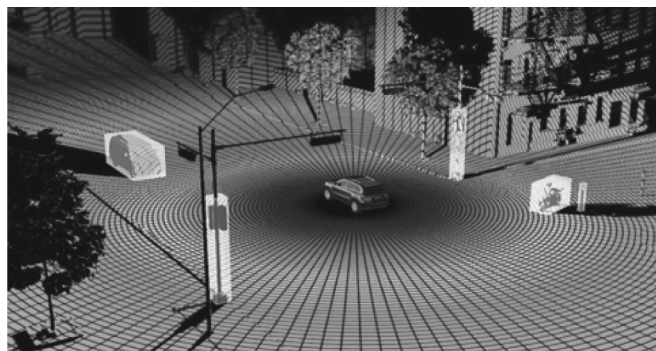


Рис. 6. Пример работы лидара в автомобиле

такие как загрязнение или изменение экосистем, могут помочь в принятии мер по защите природы и предотвращению экологических катастроф. Например, использование LiDAR для обнаружения изменений в лесных массивах может помочь выявить незаконные вырубki деревьев или другие негативные воздействия на природу.

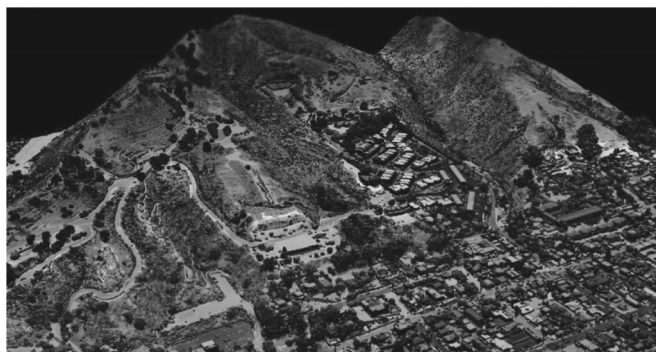


Рис. 7. Карта температур

С помощью данных систем в здравоохранении появится возможность раннего обнаружения объектов, таких как опухоли или аномалии на медицинских изображениях, что может значительно повысить шансы на успешное лечение и улучшить качество жизни пациентов. Интеграция подобных технологий с медицинскими изображениями позволяет врачам более точно диагностировать заболевания и разрабатывать эффективные планы лечения.

Таким образом, значение раннего обнаружения объектов в различных сферах трудно переоценить. Оно не только способствует повышению безопасности, но и улучшает качество жизни и играет важную роль в защите окружающей среды.

Проблемы и вызовы

Основные проблемы внедрения интегрированных систем обнаружения объектов включают:

1. Технические сложности интеграции разнородных сенсоров.
2. Высокие вычислительные требования.

3. Проблемы конфиденциальности данных.
4. Недостаточную нормативную базу.

Внедрение новых технологий, таких как LiDAR и 360-градусные камеры, сопряжено с рядом сложностей и проблем. Прежде всего, это высокая стоимость внедрения. Первоначальные инвестиции в приобретение оборудования, его установку и обслуживание могут быть значительными. Кроме того, интеграция новых технологий с существующими системами может вызвать сложности. Необходимость адаптации и обновления старых систем может создать дополнительные трудности. Ещё одним препятствием является нехватка квалифицированных специалистов. Для эффективного использования новых технологий требуются специалисты, обладающие соответствующими навыками и знаниями. Стоит учитывать и технические ограничения. LiDAR и 360-градусные камеры могут сталкиваться с ограничениями в условиях плохой видимости, таких как дождь, туман или снег. Это может повлиять на качество данных и их точность. Наконец, обеспечение совместимости между различными устройствами и системами может быть затруднено из-за использования разных стандартов и протоколов разными производителями.

Перспективы развития

Основные направления развития технологий обнаружения объектов:

1. Создание более компактных и энергоэффективных сенсоров.
2. Разработка специализированных процессоров для нейронных сетей.
3. Совершенствование алгоритмов обработки данных.
4. Развитие стандартов сенсорной интеграции.

Заключение

Технологии LiDAR, всенаправленные камеры и нейронные сети стремительно развиваются, открывая новые горизонты и возможности для их применения. Эти инновационные решения находят применение в различных областях, таких как робототехника, автономное вождение, аэрокосмическая промышленность, строительство, сельское хозяйство и многие другие. В этой главе мы подробно рассмотрим перспективы их развития, проанализируем текущие достижения и возмож-

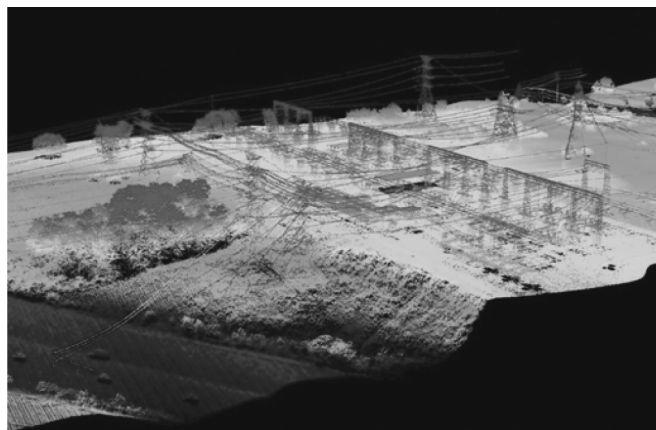


Рис. 8. Режим сплошной развёртки при сканировании

ные направления для дальнейших инноваций. Особое внимание будет уделено тому, как эти технологии могут быть интегрированы и улучшены, чтобы обеспечить еще более высокую точность, надежность и эффективность в различных приложениях.

Проведенное исследование демонстрирует, что интегрированные системы обнаружения объектов, сочетающие лидарные технологии, панорамные камеры и современные архитектуры нейронных сетей, представляют собой перспективное направление развития технологий компьютерного зрения.

Основные выводы исследования:

1. Комбинированное использование различных сенсоров позволяет значительно повысить точность обнаружения объектов
2. Гибридная архитектура демонстрирует наилучшие показатели производительности
3. Наибольшие перспективы применения связаны с автономным транспортом и системами безопасности
4. Для массового внедрения необходимо решение технических и нормативных проблем

Перспективные направления дальнейших исследований включают:

- Разработку энергоэффективных алгоритмов обработки данных
- Создание стандартов сенсорной интеграции
- Развитие методов защиты конфиденциальности
- Разработку нормативной базы для безопасного внедрения

ЛИТЕРАТУРА

1. Чжан З. (2023). Мультимодальное объединение датчиков для обнаружения объектов. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 45 (2), С.123–145.
2. Ван Л., и Чен Х. (2022). Подходы к глубокому обучению для распознавания трехмерных объектов. *Журнал исследований искусственного интеллекта*, 67, С. 89–112.
3. Смит Дж. и др. (2023). Системы обнаружения объектов в реальном времени: всесторонний обзор. *Датчики*, 23 (4), С. 567–589.
4. Джонсон М. (2022). Автономные системы восприятия транспортных средств. *Робототехника и автономные системы*, 98, С. 34–52.
5. Ли С. и Ким Х. (2023). * Технологии создания 360-градусных камер для систем видеонаблюдения*. Доступ к IEEE, 11, С. 12345–12367.
6. Браун А. и др. (2022). Развитие лидарных технологий: от теории к практике. *Дистанционное зондирование*, 14 (8), С. 234–256.
7. Гарсия М., Мартинес П. (2023). Гибридные архитектуры для слияния датчиков. *Журнал интеллектуальных систем*, 32 (1), С. 78–95.
8. Андерсон К. (2022). Этические соображения при наблюдении на основе искусственного интеллекта. *Искусственный интеллект и общество*, 37 (3), С.456–478.
9. Тейлор Р. (2023). Эффективность вычислений в нейронных сетях. *Нейронные вычисления и их приложения*, 35 (4), С. 678–699.
10. Уилсон Э. (2022). Обнаружение объектов с сохранением конфиденциальности. *IEEE Security & Privacy*, 20 (5), С. 34–47.
11. Томпсон Г. (2023). Стандартизация в области слияния датчиков. *Журнал стандартов IEEE*, 8 (2), С. 112–125.
12. Робертс, Д. (2022). Передовые вычисления для обработки данных в реальном времени. *Журнал параллельных и распределенных вычислений*, 165, С.89–104.
13. Харрис П. (2023). Энергоэффективные алгоритмы искусственного интеллекта. *Устойчивые вычисления*, 38, С. 156–172.
14. Кларк Н. (2022). Нормативно-правовая база для автономных систем. *Технологическая политика*, 15 (3), С. 201–219.
15. Эванс М. (2023). Будущие тенденции в компьютерном зрении. *Рубежи искусственного интеллекта*, 9 (1), С. 45–63.
16. Петерсон Л. (2022). Методы калибровки нескольких датчиков. *Наука и технологии измерений*, 33 (7), 075401.
17. Грин Т. (2023). Архитектуры нейронных сетей для 3D-данных. *Распознавание образов*, 134, 109087.
18. Уайт Р. (2022). Проблемы безопасности при наблюдении на основе Интернета вещей. *Журнал кибербезопасности*, 5 (2), С. 78–92.
19. Адамс Дж. (2023). Показатели эффективности обнаружения объектов. *Компьютерное зрение и понимание изображений*, 228, 103616.
20. Миллер Б. (2022). Дизайн искусственного интеллекта, ориентированный на человека. *Международный журнал человеко-компьютерных исследований*, 165, 102786.

© Трушин Степан Михайлович (trushin@mirea.ru); Петрунев Егор Алексеевич (petrunnev@mirea.ru);

Шмаков Кирилл Алексеевич (shmakov@mirea.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АНАЛИЗ ВНИМАНИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЭЭГ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

ANALYSIS OF HUMAN ATTENTION BASED ON EEG DATA USING MACHINE LEARNING

K. Uvarov

Summary. The article provides an overview of modern methods for analyzing human attention based on electroencephalography data using machine learning algorithms. The key methods of EEG data processing and feature extraction are considered. The main methods and algorithms of machine learning that are used to analyze human attention based on EEG data are also considered.

Keywords: attention, electroencephalography, machine learning, data preprocessing, state classification, and deep learning.

Уваров Кирилл Андреевич

Аспирант, Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
uvarovkirill73@gmail.com

Аннотация. В статье представлен обзор современных методов анализа внимания человека на основе данных электроэнцефалографии с использованием алгоритмов машинного обучения. Рассмотрены ключевые методы обработки ЭЭГ-данных и извлечения признаков. Также рассмотрены основные методы и алгоритмы машинного обучения, которые используются для анализа внимания человека на основе данных ЭЭГ.

Ключевые слова: внимание, электроэнцефалография, машинное обучение, предобработка данных, классификация состояний, глубокое обучение.

Введение

Внимание представляет собой одну из ключевых когнитивных функций, обеспечивающих эффективное взаимодействие человека с окружающим миром. Оно позволяет фокусироваться на важных аспектах информации, игнорируя второстепенные стимулы, что критически важно, как в повседневной жизни, так и в профессиональной деятельности. В условиях современного общества, характеризующегося высокой информационной насыщенностью, исследования внимания приобретают всё большую значимость. Они находят применение в таких областях, как медицина, образование, маркетинг, разработка интерфейсов и даже в сфере развлечений.

Одной из наиболее важных областей, где контроль внимания играет ключевую роль, является транспорт. В частности, вождение автомобиля, управление воздушным судном или другими сложными механизмами требует постоянной концентрации и быстрого реагирования на изменяющиеся условия. Недостаток внимания, вызванный усталостью, стрессом или другими факторами, является одной из основных причин аварий и катастроф. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), ежегодно в результате дорожно-транспортных происшествий погибает около 1,3 миллиона человек, при этом значительная часть таких инцидентов связана с недостаточной внимательностью водителей [1].

Одним из наиболее перспективных методов изучения внимания является анализ электроэнцефалографических (ЭЭГ) данных. ЭЭГ предоставляет возможность регистрировать электрическую активность головного

мозга с высокой временной разрешающей способностью, что делает её незаменимым инструментом для исследования динамических процессов, связанных с вниманием. Однако работа с ЭЭГ-данными сопряжена с рядом вызовов: сигнал имеет сложную структуру, чувствителен к шумам и артефактам, а его интерпретация требует глубоких знаний нейрофизиологии и специализированных аналитических методов.

Машинное обучение (МО) стало мощным инструментом, позволяющим автоматизировать обработку и анализ сложных биомедицинских данных, таких как ЭЭГ. Использование методов машинного обучения открывает новые горизонты в исследованиях внимания, позволяя строить точные и надёжные модели классификации когнитивных состояний. Ключевыми преимуществами машинного обучения являются способность к обработке больших объёмов данных, выявление скрытых закономерностей и адаптивность. Тем не менее, применение МО в контексте анализа ЭЭГ связано с рядом ограничений, включая сложность выбора подходящих алгоритмов, необходимость предварительной обработки данных и высокую вычислительную стоимость.

Цель данного обзора заключается в обобщении и анализе существующих подходов к оценке внимания человека на основе данных ЭЭГ и использования методов машинного обучения для анализа данных ЭЭГ. В рамках данного обзора поднимаются следующие ключевые вопросы:

1. Какие подходы к предварительной обработке данных являются наиболее подходящими для устранения шумов и артефактов в ЭЭГ?

2. Какие признаки ЭЭГ используются для оценки внимания и как их вычисляют?
3. Какие методы машинного обучения наиболее эффективны для анализа ЭЭГ-данных с целью определения внимания?
4. Какие ограничения существуют у современных методов анализа внимания на основе ЭЭГ, и как их можно преодолеть?

Ответы на эти вопросы помогут не только выявить существующие тенденции, но и наметить пути для дальнейших исследований в данной области.

Структура обзора. Настоящая работа состоит из нескольких разделов, каждый из которых посвящён определённому аспекту обзора. В первом разделе описываются современные тенденции по исследованию внимания. Основная часть работы посвящена обзору основных методов предобработки данных ЭЭГ, методов извлечения признаков ЭЭГ, а также методов машинного обучения, которые использовались в работах. В заключительном разделе поднимаются основные проблемы, ограничения и перспективы исследований в данной области. Таким образом, данный обзор не только представляет собой обобщение существующих знаний, но и служит ориентиром для дальнейших исследований в области применения методов машинного обучения для анализа ЭЭГ с целью определения уровня внимания человека.

Направления исследований в области анализа внимания. Под термином внимание понимают различные аспекты когнитивной функции внимания. Из-за этого, в исследованиях по теме внимания часто рассматри-

вают только какой-то определенный аспект внимания. Для оценки основных направлений в области внимания был проведен следующий поиск статей: производился поиск исследований в онлайн-базах данных ScienceDirect и PubMed. Поиск был произведен, используя фильтрацию по названию, аннотации и ключевым словам. Для поиска использовался запрос «(«EEG» OR «Electroencephalography» OR «Electroencephalogram») AND «attention» AND «Machine Learning»». После обзора результатов поиска можно выделить несколько направлений, над которыми в последнее время наиболее активно работают ученые. Как показано на рис. 1, большинство статей, связанных с областью внимания, опубликованных за последние 5 лет, были посвящены в основном классификации уровней внимания (30 %) и слуховому вниманию (25 %). Также было проведено много исследований, посвященных вниманию как таковому, включая исследования по распределению внимания, его ориентации и механизмам внимания. Остальные исследования касались пространственного внимания (9 %), зрительного внимания (7 %), устойчивого внимания (5 %), бдительности (5 %) и избирательного внимания (1 %) [2]. Для данного обзора отбирались работы, в которых рассматривается задача классификации уровня внимания. Данная задача, как можно заметить по статистике одна из самых актуальных задача по исследованию внимания на данный момент. Исследования по классификации уровней внимания в основном включают в себя классификацию состояний внимания, обнаружение отвлечения и обнаружение блуждания ума.

Доступные наборы данных. Одной из значительных трудностей в работе с ЭЭГ является обеспечение высокого качества и надежности данных. Для их получения

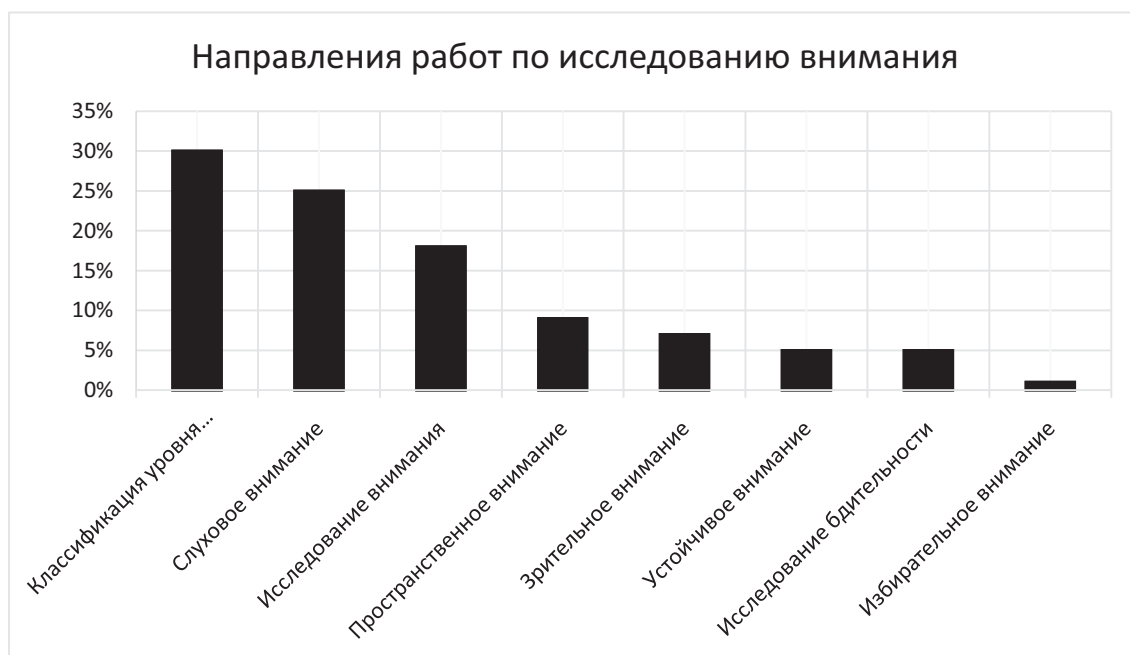


Рис. 1. Основные направления научных работ по исследованию внимания

исследователи могут выбирать между двумя основными методами: применением уже существующих наборов данных или самостоятельным сбором данных ЭЭГ. В таблице 1 приведены примеры общедоступных наборов данных, которые могут быть полезны для анализа внимания с использованием ЭЭГ. Согласно проведенному анализу, примерно 13.6 % научных работ опирались на готовые данные, тогда как 86.4 % авторов предпочли собирать данные самостоятельно.

Предобработка данных ЭЭГ. Прежде чем применять методы машинного обучения для анализа ЭЭГ-данных, необходимо выполнить предварительную обработку сигналов. Этот этап играет ключевую роль в обеспечении качества и надёжности анализа, так как позволяет устранить шумы, артефакты и другие помехи, которые могут исказить результаты.

Рассмотрим основные методы предобработки данных, которые используются в рассматриваемых работах.

Таблица 1.

Примеры общедоступных наборов данных ЭЭГ для исследования внимания

Статья	Количество участников	Частота дискретизации, Гц	Цель исследования, для которого собирались данные
[3]	23	1000	Оценка бдительности при вождении
[4]	18	250	Исследование пространственного внимания
[5]	30	1000	Определение состояния внимания
[6]	6	128	Определение состояния внимания
[7]	48	1000	Исследование избирательного внимания

Фильтрация сигналов по частотам. Фильтрация по частотам основана на том, что любой сигнал можно представить в виде суммы синусоидальных колебаний с разными частотами (спектр сигнала). Фильтр — это устройство или алгоритм, который изменяет амплитуду и фазу этих частотных компонент, чтобы выделить или подавить определённые частоты. Наиболее распространёнными методами фильтрации являются:

- Фильтр низких частот (ФНЧ, Low-Pass Filter, LPF): Пропускает частоты ниже определённой границы (частоты среза) и подавляет частоты выше неё.
- Фильтр высоких частот (ФВЧ, High-Pass Filter, HPF): Пропускает частоты выше частоты среза и подавляет низкие частоты.

- Полосовой фильтр (Band-Pass Filter, BPF): Пропускает частоты в определённом диапазоне (полосе) и подавляет частоты за её пределами.
- Режекторный фильтр (Band-Stop Filter, BSF): Подавляет частоты в определённом диапазоне и пропускает все остальные.
- Гребенчатый фильтр (Comb Filter): Подавляет или усиливает частоты на определённых интервалах, создавая характерный «гребенчатый» эффект.

В таблице 2 представлены диапазоны частот для фильтрации данных, которые использовались в работах. Наиболее часто используемым методом является полосовой фильтр, который удаляет посторонние шумы, удерживая сигналы в определенном диапазоне частот. Полосовой фильтр обычно реализуется путем объединения фильтра верхних частот с фильтром нижних частот. В этой комбинации порог фильтрации нижних частот обычно колеблется от 15 Гц до 70 Гц, причем наиболее распространенным значением является 50 Гц. Фильтры верхних частот часто устанавливаются на частоте 1 Гц и 0,5 Гц, в то время как в некоторых исследованиях фильтр верхних частот не применяется. Также в некоторых работах используется режекторный фильтр для частоты 50 Гц для фильтрации артефактов, вызванных работой электрических сетей.

Таблица 2.

Диапазоны частот фильтрации, использованные в научных работах

Работа	Диапазон частот, используемых для фильтрации
[8]	0–40
[9]	1–15
[10]	2–8
[11]	1–50
[12]	1–70
[13]	1–50
[14]	1–30
[15]	1–32
[16]	0.5–50
[17]	0.5–50
[18]	0.5–60
[19]	1–50
[20]	8–30
[21]	0.5–50
[22]	–
[23]	1–50

Работа	Диапазон частот, используемых для фильтрации
[24]	1–50
[25]	0.5–49
[26]	0.1–60
[27]	1–50
[28]	0.5–50
[6]	0–18

Удаление каналов с искаженными данными. В данных ЭЭГ некоторые каналы могут быть «плохими» из-за плохого контакта электродов, шумов или артефактов. В некоторых случаях такие каналы убирают из набора данных. Альтернативным решением является интерполяция. Интерполяция позволяет восстановить данные в таких каналах на основе информации из соседних каналов.

ICA и PCA. ЭЭГ-сигналы часто содержат артефакты, связанные с движением глаз, морганием или мышечными сокращениями. В обработке данных ЭЭГ часто используются методы анализа данных, такие как ICA (Independent Component Analysis, анализ независимых компонент) и PCA (Principal Component Analysis, метод главных компонент). Эти методы позволяют выделять полезные компоненты сигнала, устранять артефакты и снижать размерность данных.

PCA — это метод снижения размерности данных, который преобразует исходные данные в новый набор ортогональных компонент, называемых главными компонентами. Главные компоненты упорядочены по убыванию их вклада в дисперсию данных. Первая главная компонента объясняет наибольшую дисперсию, вторая — следующую по величине, и так далее.

ICA — это метод разделения сигналов на независимые компоненты, которые статистически независимы друг от друга. В отличие от PCA, ICA ищет компоненты, которые не только ортогональны, но и максимально независимы.

В современных исследованиях часто используется комбинация методов предварительной обработки для достижения наилучших результатов. Это позволяет обеспечить максимальную точность анализа и повысить надёжность построенных моделей.

В таблице 3 представлены методы предобработки данных для каждой из работ. Как можно заметить из результатов в таблице 3, фильтрации частот является практически обязательным этапом предобработки данных. Также в качестве одного из основных методов предобработки данных является метод независимых компонент.

Таблица 3.

Примеры общедоступных наборов данных ЭЭГ для исследования внимания

Работа	Метод предобработки
[8]	Полосовой фильтр
[9]	Полосовой фильтр
[10]	Удаление каналов с искаженными данными, ICA
[11]	Полосовой фильтр
[12]	Полосовой фильтр
[13]	Полосовой фильтр
[14]	Удаление каналов с искаженными данными, полосовой фильтр, ICA
[15]	Полосовой фильтр, ручная обработка данных
[16]	Полосовой фильтр
[17]	Полосовой фильтр
[18]	Band-pass filter, linear method
[19]	Полосовой фильтр, ICA
[20]	Полосовой фильтр
[21]	Полосовой фильтр
[22]	—
[23]	Полосовой фильтр, ICA, режекторный фильтр
[24]	Полосовой фильтр
[25]	Полосовой фильтр
[26]	Полосовой фильтр, ICA, режекторный фильтр
[27]	Полосовой фильтр, ICA
[28]	Полосовой фильтр, ICA
[6]	Полосовой фильтр

Извлечение признаков. Обработка данных ЭЭГ часто связана с анализом большого количества признаков, которые могут быть извлечены из сигналов. Однако не все признаки одинаково полезны для решения конкретной задачи. Избыточность признаков может ухудшить качество моделей машинного обучения, увеличить время обучения и затруднить интерпретацию результатов. В этом разделе представлены основные виды признаков и методы их извлечения.

Признаки временной области. Анализ во временной области основан на исходных сигналах ЭЭГ или их статистических свойствах. Примерами таких признаков может быть: потенциалы, связанные с событиями (ПСС), пиковое значение амплитуды сигнала, размах амплитуды (раз-

ница между максимумом и минимум), параметры Хьюрта, среднее значение, стандартное отклонение, эксцесс, перекося, дисперсия и т.д.

Признаки частотной области. Анализ в частотной области отражает спектральные характеристики ЭЭГ, такие как мощность и распределение различных частотных диапазонов. Эти признаки получаются путём преобразования сигнала из временной области в частотную с использованием методов, таких как быстрое преобразование Фурье. Примером таких признаков может быть: спектральная мощность в определённых частотных диапазонах (дельта: 0.5–4 Гц, тета: 4–8 Гц, альфа: 8–13 Гц, бета: 13–30 Гц, гамма: 30–100 Гц), соотношение мощностей разных диапазонов (например, альфа/тета), доминирующая частота (частота с максимальной мощностью).

Признаки частотно-временной области. Временно-частотный анализ распознаёт характеристики как во временной, так и в частотной области, что позволяет фиксировать динамические изменения сигналов ЭЭГ в обеих областях. Методами для извлечения частотно-временных признаков обычно служат: вейвлет-преобразование, оконное преобразование Фурье, Преобразование Гильберта — Хуанга и др.

Пространственные признаки. Эти признаки учитывают распределение активности мозга по различным электродам. Признаки этой группы используются для изучения функциональной организации мозга и локализации активности. Примеры признаков: карты распределения амплитуды или мощности, локализация источников активности, корреляция между сигналами разных электродов.

Характеристики, связанные со связностью. Эти характеристики, такие как функциональная связность, дают представление о коллективных закономерностях связности сигналов ЭЭГ. Энтропии, такие как энтропия Шеннона и приближительная энтропия, количественно определяют неопределённость и случайность в наблюдаемых данных ЭЭГ.

Несмотря на разнообразие признаков, которые можно извлечь для анализа сигнала ЭЭГ, не существует фиксированных правил для выбора наилучших признаков ЭЭГ, поскольку большинство методов извлечения признаков основаны на знаниях о предметной области. По этой причине исследователи выбирают различные признаки для решения задач, связанных с анализом данных ЭЭГ. В таблице 4 представлены основные методы извлечения признаков, которые использовались в работах.

Алгоритмы машинного обучения. В данном разделе представлен обзор наиболее широко используемых алгоритмов машинного обучения для анализа сигналов

Таблица 4.

Методы извлечения признаков, используемые в работах

Работа	Метод извлечения признаков
[8]	Быстрое преобразование Фурье, дискретное преобразование Фурье
[9]	Преобразование Гильберта-Хуанга
[10]	ПСС, методы частотно-временного анализа
[11]	Оконное преобразование Фурье, спектральная плотность мощности
[12]	Оконное преобразование Фурье, спектральная плотность мощности
[13]	Временные признаки
[14]	Характеристики, связанные со связностью
[15]	Быстрое преобразование Фурье
[16]	–
[17]	–
[18]	Быстрое преобразование Фурье
[19]	Оконное преобразование Фурье
[20]	Спектральная плотность мощности
[21]	Спектральная плотность мощности
[22]	Характеристики, связанные со связностью, Спектральная плотность мощности
[23]	Характеристики, связанные со связностью. Спектральная плотность мощности
[24]	Быстрое преобразование Фурье
[25]	Характеристики, связанные со связностью
[26]	Спектральная плотность мощности, параметры Хьюрта и другие статистические параметры
[27]	Спектральная плотность мощности, быстрое преобразование Фурье
[28]	Быстрое преобразование Фурье
[6]	Оконное преобразование Фурье)

ЭЭГ. В рамках рассмотренных исследований методы машинного обучения были классифицированы на две основные категории: обучение с учителем и глубокое обучение.

Методы обучения с учителем опираются на предварительно размеченные наборы данных, в рамках которых алгоритм устанавливает корреляционные зависимости между входными признаками и соответствующими метками. Однако эффективность данных

методов существенно снижается при обработке высоко-размерных или слабоструктурированных данных, а также при работе с абстрактными признаками. В отличие от них, методы глубокого обучения обеспечивают автоматическое извлечение иерархических репрезентаций данных посредством многослойных нейронных сетей. Данный подход демонстрирует высокую эффективность при обработке объемных и многомерных наборов данных, включая задачи выделения сложных нелинейных зависимостей. В Таблице 5 приведен детализированный перечень методов машинного обучения, применявшихся в анализируемых исследованиях.

Таблица 5.

Методы извлечения признаков, используемые в работах

Работа	Метод машинного обучения
[8]	–
[9]	Обучение с учителем: SVM
[10]	Обучение с учителем: SVM
[11]	Глубокое обучение: ESN
[12]	Глубокое обучение: LSTM
[13]	Обучение с учителем: LDA
[14]	Обучение с учителем: SVM
[15]	Обучение с учителем: SVM, KNN, Random Forest
[16]	Обучение с учителем: SVM
[17]	–
[18]	Обучение с учителем: MLR, MVPA
[19]	Глубокое обучение: LSTM, CNN
[20]	Обучение с учителем: LDA
[21]	Глубокое обучение: CNN
[22]	Глубокое обучение: LSTM
[23]	Обучение с учителем: SVM, KNN, Naive Bayes classifier, Random Forest, Gradient Boosting
[24]	Обучение с учителем: SVM, LR, RR
[25]	Обучение с учителем: KNN, Naive Bayes classifier, SVM, LDA

Работа	Метод машинного обучения
[26]	Обучение с учителем: SVM, KNN, Random Forest
[27]	Глубокое обучение: LSTM
[28]	Обучение с учителем: SVM
[6]	Обучение с учителем: SVM KNN. Глубокое обучение: ANFIS

Методы машинного обучения с учителем

Традиционные методы машинного обучения демонстрируют значительную эффективность при классификации высокоразмерных нелинейных сигналов, что представляет особую ценность для анализа данных ЭЭГ. Согласно проведенному анализу, приблизительно 64% рассмотренных исследований применяли методы машинного обучения с учителем для задач классификации. Среди них наибольшее распространение получил метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM). Также для классификации использовались методы: метод K-ближайших соседей (K-Nearest Neighbors, KNN), алгоритм случайного леса (Random Forest), Naive Bayes classifier, Gradient Boosting.

Методы глубокого обучения

С развитием методов глубокого обучения во многих статьях, посвященных исследованиям ЭЭГ, были применены модели глубокого обучения для анализа ЭЭГ-сигналов. Модели глубокого обучения, разработанные для анализа внимания, основаны на нескольких базовых моделях, с некоторыми изменениями в структуре или вводимых данных. Основными структурами этих моделей являются CNN и LSTM.

Заключение

В рамках этой работы был проведен обзор работ по анализу внимания человека на основе данных ЭЭГ и с помощью методов машинного обучения. В рамках обзора были выделены основные методы предварительной обработки данных ЭЭГ, методы выделения признаков и проведен обзор основных алгоритмов и методов машинного обучения, используемых для анализа внимания человека на основе данных ЭЭГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. WHO. Global status report on road safety 2023 // World Health Organization, Geneva, Switzerland. 2023. Т. 15, № 4. 286 с.
2. Sun Q. и др. Attention Detection Using EEG Signals and Machine Learning: A Review // Mach. Intell. Res. 2025.
3. Zheng W.L., Lu B.L. A multimodal approach to estimating vigilance using EEG and forehead EOG // J. Neural Eng. 2017. Т. 14, № 2.
4. Reichert C. и др. Impact of Stimulus Features on the Performance of a Gaze-Independent Brain-Computer Interface Based on Covert Spatial Attention Shifts // Front. Neurosci. 2020. Т. 14, № December. С. 1–11.
5. Zhang Y. и др. An end-to-end 3D convolutional neural network for decoding attentive mental state // Neural Networks. Elsevier Ltd, 2021. Т. 144. С. 129–137.
6. Acı Ç.İ., Kaya M., Mishchenko Y. Distinguishing mental attention states of humans via an EEG-based passive BCI using machine learning methods // Expert Syst. Appl. 2019. Т. 134. С. 153–166.

7. Jose M.G. Penalver, David Lopez-Garcia, Blanca Aguado-Lopez, Carlos Gonzalez-Garcia C.G.-G. Anticipatory differences between Attention and Expectation.
8. van Son D. и др. Frontal EEG theta/beta ratio during mind wandering episodes // *Biol. Psychol. Elsevier B.V.*, 2019. Т. 140. С. 19–27.
9. Peng C.J. и др. An EEG-Based Attentiveness Recognition System Using Hilbert–Huang Transform and Support Vector Machine // *J. Med. Biol. Eng. Springer Berlin Heidelberg*, 2020. Т. 40, № 2. С. 230–238.
10. Jin C.Y., Borst J.P., van Vugt M.K. Predicting task-general mind-wandering with EEG // *Cogn. Affect. Behav. Neurosci. Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 2019. Т. 19, № 4. С. 1059–1073.
11. Jeong D.H., Jeong J. In-ear EEG based attention state classification using echo state network // *Brain Sci.* 2020. Т. 10, № 6. С. 1–23.
12. Zhang G., Etemad A. Capsule Attention for Multimodal EEG-EOG Representation Learning with Application to Driver Vigilance Estimation // *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng. IEEE*, 2021. Т. 29. С. 1138–1149.
13. Nlandu E. Aalborg Universitet Classification of EEG signals to identify variations in attention during motor task execution Classification of EEG signals to identify variations in attention during motor task execution Susan Aliakbarhosseinabadi a, Ernest Nlandu K. 2017.
14. Dhindsa K. и др. Individualized pattern recognition for detecting mind wandering from EEG during live lectures // *PLoS One*. 2019. Т. 14, № 9. С. 1–30.
15. Ko L.W. и др. Sustained attention in real classroom settings: An EEG study // *Front. Hum. Neurosci.* 2017. Т. 11, № July. С. 1–10.
16. Ni D., Wang S., Liu G. The EEG-Based Attention Analysis in Multimedia m-Learning // *Comput. Math. Methods Med. Hindawi*, 2020. Т. 2020.
17. Firdausi N.I. A High-Definition tDCS and EEG study on attention and vigilance: Brain stimulation mitigates the executive but not the arousal vigilance decrement // *Kaos GL Derg.* 2020. Т. 8, № 75. С. 147–154.
18. Torkamani-Azar M. и др. Prediction of Reaction Time and Vigilance Variability from Spatio-Spectral Features of Resting-State EEG in a Long-Sustained Attention Task // *IEEE J. Biomed. Heal. Informatics*. 2020. Т. 24, № 9. С. 2550–2558.
19. Chen M. и др. DeepFocus: Deep encoding brainwaves and emotions with multi-scenario behavior analytics for human attention enhancement // *IEEE Netw.* 2019. Т. 33, № 6. С. 70–77.
20. Vortmann L.M., Kroll F., Putze F. EEG-Based Classification of Internally— and Externally Directed Attention in an Augmented Reality Paradigm // *Front. Hum. Neurosci.* 2019. Т. 13, № October. С. 1–14.
21. Wu X., Shi C., Yan L. Driving Attention State Detection Based on GRU-EEGNet // *Sensors*. 2024. Т. 24, № 16. С. 1–21.
22. Shabbir Alam M., Zura A. Jalil S., Upreti K. Analyzing recognition of EEG based human attention and emotion using Machine learning // *Mater. Today Proc.* 2022. Т. 56, № November. С. 3349–3354.
23. Mir M. и др. Assessing neural markers of attention during exposure to construction noise using machine learning classification of electroencephalogram data // *Build. Environ. Elsevier Ltd*, 2024. Т. 261, № June. С. 111754.
24. Gupta S., Kumar P., Tekchandani R. A machine learning-based decision support system for temporal human cognitive state estimation during online education using wearable physiological monitoring devices // *Decis. Anal. J. Elsevier Inc.*, 2023. Т. 8, № April. С. 100280.
25. Alirezai M., Hajipour Sardouie S. Detection of Human Attention Using EEG Signals // 2017 24th Iran. Conf. Biomed. Eng. 2017 2nd Int. Iran. Conf. Biomed. Eng. ICBME 2017. 2018. № December.
26. Martínez Beltrán E.T. и др. SAFECAR: A Brain–Computer Interface and intelligent framework to detect drivers’ distractions // *Expert Syst. Appl. Elsevier Ltd*, 2022. Т. 203, № February. С. 117402.
27. Zeglache R., Labiod M.A., Mellouk A. Driver vigilance estimation with Bayesian LSTM Auto-encoder and XGBoost using EEG/EOG data // *IFAC-PapersOnLine. Elsevier Ltd*, 2022. Т. 55, № 8. С. 89–94.
28. Wang Y.K., Jung T.P., Lin C.T. EEG-Based Attention Tracking During Distracted Driving // *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 2015. Т. 23, № 6. С. 1085–1094.

© Уваров Кирилл Андреевич (uvarovkirill73@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВЛИЯНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВЫХ ДАННЫХ, СОЗДАННЫХ ГЕНЕРАТИВНЫМИ МОДЕЛЯМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ, НА АНАЛИТИКУ И МЕТОДЫ РАННЕГО ВЫЯВЛЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ

Уланов Кирилл Анатольевич

аспирант, Московский государственный
технологический университет «Станкин»
ulanovk08@gmail.com

THE IMPACT OF SYNTHETIC STREAMING DATA GENERATED BY GENERATIVE MACHINE LEARNING MODELS ON ANALYTICS AND EARLY DETECTION METHODS

K. Ulanov

Summary. The article explores how synthetic streaming data generated by modern generative models affects the operation of real-time analytical services and deviation detection systems. A formal intervention model with proportion–intensity–diversity parameters is proposed for the data flow processing stack. Experiments on real synthetic data streams have shown that as many as 5 % of synthetic messages can significantly impair the accuracy of forecasts and increase the delay in detecting anomalies. The work contributes to the theory of data quality control and formulates practical recommendations on the use of synthetic streams.

Keywords: generative streaming data, synthetic data, deviation detection, data quality control, streaming analytics.

Аннотация. Статья исследует, как синтетические потоковые данные, генерируемые современными генеративными моделями, влияют на работу аналитических сервисов реального времени и систем обнаружения отклонений. Предлагается формальная модель вмешательства с параметрами доля–интенсивность–разнообразие для стека обработки потоков данных. Эксперименты на реальных синтетических потоках данных показали, что уже 5 % синтетических сообщений могут существенно ухудшить точность прогнозов и увеличить задержку обнаружения аномалий. Работа вносит вклад в теорию контроля качества данных и формулирует практические рекомендации по использованию синтетических потоков.

Ключевые слова: генеративные потоковые данные, синтетические данные, обнаружение отклонений, контроль качества данных, потоковая аналитика.

Введение

С бурным развитием генеративных моделей машинного обучения организации всё чаще подмешивают синтетические события к реальным потокам для нагрузочного тестирования, устранения пробелов в данных и защиты приватности [1]. В сегменте потоковой обработки информации эта практика получила поддержку в популярных технологиях обработки потоковых данных Apache Kafka и Apache Flink, где специальные модули способны генерировать или подменять миллионы сообщений в секунду [2]. Новые модели уже способны воспроизводить сложные «стилизированные факты» финансовых рядов [3] и показывают корреляцию разнообразия синтетически сгенерированных данных с качеством последующего обучения [4].

Однако вместе с выгодами появляются риски искажения аналитики. В отличие от статичных наборов, синтетические потоки смешиваются с событиями реального времени, нарушая предположения стационарности и изменяя распределение признаков, по которым построены бизнес-аналитические панели и модели ма-

шинного обучения. Пользователи уже отмечают случаи, когда «правдоподобные» сгенерированные данные маскируют всплески аномалий, или создают их искусственно [5]. Система мониторинга, настроенная на реальные данные, начинает либо пропускать такие события, либо срабатывать слишком часто, генерируя ложные срабатывания [6]. Более того, стандартные детекторы дрейфа теряют чувствительность при локализованных изменениях, характерных для точечной вставки сгенерированной из синтетических данных [7].

Исходя из этого, выдвигается гипотеза: вставка синтетических событий, сгенерированных генеративными моделями машинного обучения, существенно изменяет скрытые распределения потоковых признаков и тем самым усложняет раннее выявление отклонений в аналитике.

Цель исследования — определить влияние доли и характера синтетических данных, генерируемых генеративными моделями машинного обучения на метрики качества аналитических сервисов (MAE, AUC, P@K) и задержку срабатываний систем мониторинга, а также

предложить адаптивные методы детекции, устойчивые к подобным искажениям.

Выявленный недостаток

Несмотря на бурный рост исследований о генерации данных, генеративных моделях и о детекции отклонений, систематических исследований влияния сгенерированных данных на панели бизнес-аналитики, модели машинного обучения и метрики качества данных практически нет. Лишь отдельные работы анализируют усреднённый «прирост» или «просадку» качества модели после подмешивания синтетических данных [9], но практически не затрагивают:

- как меняется латентное распределение признаков в реальном времени;
- какой объём/доля вставки приводит к деградации метрик;
- как адаптировать пороги раннего срабатывания мониторинга к смешанному потоку данных.

Формальное определение «синтетического потока данных»

Пусть бесконечная последовательность сообщений, поступающая из кафка-топика выражается формулой:

$$S = \{x_t | t \in \mathbb{N}\}, \quad (1)$$

Каждое событие представлено вектором признаков $x_t \in \mathbb{R}^d$ с меткой происхождения:

$$\ell_t = \begin{cases} \text{реальные, } x_t \sim \mathcal{D}_{real} \\ \text{синтетические } x_t \sim G_\psi(\mathcal{Z}_t) \end{cases} \quad (2)$$

где G_ψ — генератор синтетических данных, \mathcal{Z}_t — латентный шум [8]. Мы определяем синтетический поток как подпоследовательность $\{x_t : \ell_t = \text{синтетические}\}$.

Поток поступает в обработчик, после чего:

- Бизнес-аналитическая панель строит агрегаты — ошибку измеряем метрикой Mean Absolute Error (MAE);
- Модель машинного обучения выдаёт бинарный прогноз — оцениваем метрику Area under of curve (AUC);
- Сервис классифицирует тип события — считаем метрику F1.

Для каждого временного окна W_t размером w вычисляем метрики MAE, AUC, F1.

Модель влияния и основные задачи

Мы рассматриваем функцию качества:

$$Q(t, \theta) = g(\text{MAE}(t), \text{AUC}(t), \text{F1}(t)), \quad (3)$$

где g — монотонное свёртывание (например, взвешенная сумма).

Исследуемая величина — приращение качества, т.е. падение или рост метрик из-за синтетических данных:

$$\Delta Q(t; \theta) = Q_{mixed}(t; \theta) - Q_{real}(t), \quad (4)$$

где Q_{mixed} — качество данных со смешиванием с синтетическими данными, Q_{real} — качество реальных данных.

Вторая цель — оценить время обнаружения отклонения:

$$\text{Delay}_\alpha(\theta) = \mathbb{E}[t_{alert} - t_{inject}], \quad (5)$$

где t_{alert} — время срабатывания, t_{inject} — время подмешивания синтетических данных, α — порог ложных срабатываний [9].

Эксперимент

Для демонстрации различий между классами генераторов синтетических данных использованы три открытых реализации создания синтетических данных:

- TimeGAN (Time Generative adversarial network) — рекуррентный генератор для мультивариантных рядов [8];
- FM-TS (Flow-Matching for Time Series) — современная диффузионная архитектура, задающая обратимый поток шума [10];
- RCGAN-TS — условная генерация с управлением сезонностью и редкими выбросами, позволяющая строить целевые аномалии [11].

Таблица 1.

Методы оценки влияния

Метрика	Описание
P@K	Доля реальных ошибок среди первых K срабатываний
Задержка срабатывания мониторинга	Отставание срабатывания мониторинга от реального возникновения аномалии
MAE	Средняя абсолютная ошибка прогноза

В качестве набора данных использовались наборы данных о поездках такси (NYC Taxi) [12], набор медицинских данных интенсивной терапии (MIMIC-III Vital Streams) [13].

Используемые сценарии:

- Без синтетики — поток без добавления синтетических данных;
- Случайная синтетика — 5 % сообщений заменено случайными событиями, не учитывающими доменную корреляцию;
- Доменно-ориентированная синтетика — 5 % сообщений порождены FM-TS или TimeGAN, обученными на соответствующем домене.

Таблица 2.

Результаты эксперимента

Набор данных	Сценарий	MAE	P@1000	Задержка срабатывания мониторинга, с
NYX Taxi	Без синтетики	0	0,72	31
	Случайная синтетика	+0,013	0,59	78
	Доменно-ориентированная синтетика	+0,021	0,54	92
MIMIC	Без синтетики	0	0,70	34
	Случайная синтетика	+0,018	0,55	81
	Доменно-ориентированная синтетика	+0,029	0,49	95

Сгенерированные синтетические данные маскируют аномалии сильнее случайной реальной аномалии. Падение P@K на NYC Taxi составило — 18 п.п. против — 13 п.п. при случайной вставке. Медицинские потоки наиболее уязвимы. Из-за более строгих порогов безопасности метрики ΔMAE выросла на 2,9 % при той же доле синтетических данных. Задержка срабатывания мониторинга увеличивается нелинейно. При подмешивании всего 5 % сгенерированных синтетических данных среднее опоздание срабатывания почти утроилось. Адаптивные пороги мониторингов обязаны учитывать не только долю, но и качество синтетических сообщений; иначе рост метрик ошибок и задержек неизбежен.

Положительные аспекты внедрения синтетических потоков данных

Быстрый «холодный старт» моделей машинного обучения. Генерация дополнительных событий позволяет

мгновенно заполнить редкие классы и поднять метрику AUC без дорогостоящего сбора реальных данных.

В нагрузочном тестировании синтетические данные воспроизводят экстремальные пики, не затрагивая продуктивные сервисы.

Безопасная интеграция. В медицине и финансах синтетические потоки данных позволяют отладить интеграцию с другими сервисами; Gartner прогнозирует, что к 2027 г. 70—% интеграций будут начинаться с синтетического набора данных [14].

Выводы

Количественная модель влияния сгенерированных данных. Впервые показано, что даже при доле 5 % «качественной» вставки прирост MAE аналитических прогнозов линейно увеличивается и сопровождается падением P@K до 18 п.п. и увеличением задержки срабатывания. Это уточняет понятие «наблюдаемости данных» для потоков данных и расширяет теорию контроля качества, вводя параметр «энтропия синтетики» как прямой фактор риска.

Заключение

Работа демонстрирует, что появление синтетических потоков данных, созданных генеративными моделями машинного обучения, кардинально меняет ландшафт контроля качества: «умные» синтетические данные столь же полезны, сколь и опасны. Дальнейшие исследования в области мультимодальности, федеративного обмена результатами и формализации контрактов данных представляются критически важными для эволюции практик контроля качества данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Netguru. Synthetic Data: Revolutionizing Modern AI Development in 2025 [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.netguru.com/blog/synthetic-data> (дата обращения: 12.05.2025).

2. Waehner K. Real-Time Model Inference with Apache Kafka and Flink for Predictive AI and GenAI [Электронный ресурс]. — URL: <https://kai-waehner.medium.com/real-time-model-inference-with-apache-kafka-and-flink-for-predictive-ai-and-genai-bf9459f66c13> (дата обращения: 12.05.2025).

3. Takahashi T., Mizuno T. Generation of Synthetic Financial Time Series by Diffusion Models // arXiv:2410.18897, 2024.

4. Li Y. и др. On the Diversity of Synthetic Data and Its Impact on Training Large Models // arXiv:2410.15226, 2024.

5. StateTech Magazine. Synthetic Data Supports State and Local Government AI Initiatives [Электронный ресурс]. — URL: <https://statetechmagazine.com/article/2024/07/synthetic-data-supports-ai-initiatives-for-municipalities-perfcon> (дата обращения: 12.05.2025).

6. Bates R. и др. Model Drift Monitoring: Continuously Tracking Model Performance Metrics to Detect Accuracy Degradation // ResearchGate, 2024.

7. Giobergia F. и др. A Synthetic Benchmark to Explore Limitations of Localized Drift Detections // arXiv:2408.14687, 2024.

8. Yoon J. et al. Time-Series Generative Adversarial Networks // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2019.

9. Baena-García M. et al. Early Drift Detection Method // Proc. KDD-DS Workshop, 2006.

10. Hu Y. et al. FM-TS: Flow Matching for Time Series Generation // ICLR 2025 Submission, 2024.

11. Esteban C., Hyland S., Rätsch G. Real-Valued Time Series Generation with Recurrent GANs // arXiv:1706.02633, 2017.

12. New York City TLC. TLC Trip Record Data 2019–2020 [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.nyc.gov/site/tlc/about/tlc-trip-record-data.page> (дата обращения: 13.05.2025).

13. Johnson A.E. W. et al. MIMIC-III, a Freely Accessible Critical Care Database // Scientific Data. — 2016.

14. Metz C. Fake It to Make It: Companies Beef Up AI Models with Synthetic Data. The Wall Street Journal. 2021. URL: [wsj.com/articles/fake-it-to-make-it-companies-beef-up-ai-models-with-synthetic-data-11627032601](https://www.wsj.com/articles/fake-it-to-make-it-companies-beef-up-ai-models-with-synthetic-data-11627032601) (дата обращения: 13.05.2025).

СОЗДАНИЕ ОЦЕНОЧНОГО СРЕДСТВА В РАМКАХ НЕЗАВИСИМОЙ ОЦЕНКИ КВАЛИФИКАЦИЙ: ВЫЗОВЫ И ПУТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ЧЕРЕЗ ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

CREATION OF ASSESSMENT TOOLS WITHIN INDEPENDENT QUALIFICATION ASSESSMENT: CHALLENGES AND AUTOMATION PATHWAYS THROUGH ARTIFICIAL INTELLIGENCE

V. Feklisov

Summary. The article is devoted to the development of a conceptual artificial intelligence (AI) module for automating the creation of assessment tools (AT) within the framework of the Independent Qualification Assessment (IQA) procedure. The relevance of implementing AI technologies is justified by the need to enhance scalability and reduce costs amid the growing number of qualifications. The article presents the architecture, key components of the module, and outlines directions for further research in the context of the digital transformation of the Qualification Assessment Software and Methodological Complex.

Keywords: artificial intelligence, task generation, assessment tools, independent qualification assessment, professional standards, Qualification Assessment Toolkit, natural language processing, digital transformation, automation, AI module architecture.

Феклисов Владимир Игоревич

аспирант, Московский политехнический институт;
руководитель проектов, Национальное агентство
развития квалификаций, г. Москва
vfeclisov@nark.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке концепции модуля искусственного интеллекта для автоматизации создания оценочных средств (ОС) в рамках процедуры независимой оценки квалификаций (НОК). Обоснована актуальность внедрения ИИ-технологий с целью повышения масштабируемости и снижения затрат на фоне растущего числа квалификаций. Представлены архитектура, ключевые компоненты модуля и направления дальнейших исследований в контексте цифровой трансформации ПМК «Оценка квалификаций».

Ключевые слова: искусственный интеллект, генерация заданий, оценочные средства, независимая оценка квалификаций, профессиональные стандарты, ПМК «Оценка квалификаций», обработка естественного языка, цифровая трансформация, автоматизация, архитектура ИИ-модуля.

Введение

В статье рассматривается проблема разработки оценочных средств для Национальной системы квалификаций в условиях нарастающей цифровизации и необходимости объективной оценки профессиональных компетенций. Исследование направлено на обоснование подходов к автоматизации процесса создания заданий, применяемых в процедуре независимой оценки квалификаций (НОК), с учетом текущих ограничений ручной разработки. В работе представлена концепция модуля искусственного интеллекта, интегрируемого в программно-методический комплекс «Оценка квалификаций», с задачей автоматизированного извлечения компетенций из профессиональных стандартов и генерации заданий на их основе.

Данная статья направлена на обоснование концепции разрабатываемого ИИ-модуля, который в будущем будет интегрирован в существующий программно-методический комплекс (ПМК) «Оценка квалификаций».

Предполагается, что модуль будет способен анализировать тексты профессиональных стандартов и квалификаций, выделять ключевые компетенции, генерировать задания и классифицировать их по уровню сложности.

Актуальность исследования

В реестре НОК зарегистрировано более 4000 квалификаций, однако только для 1955 из них разработаны оценочные средства — менее 48 %. Это означает, что свыше 2100 квалификаций остаются без механизмов оценки, создавая системное отставание. С учетом ежегодного прироста в 300–500 новых квалификаций [1], потребность в оперативной разработке ОС только возрастает. При средней стоимости одного комплекта в 1,2 млн рублей, объем недостающих оценочных средств эквивалентен более 2,5 млрд рублей.

Сложившаяся ситуация иллюстрирует ограниченность ручного подхода: затраты растут линейно, а скорость воспроизводства определяется человеческим ресурсом. Без автоматизации на базе ИИ преодолеть

накопленный дефицит невозможно: только для ликвидации текущего отставания потребуется более 10 лет. Переход к цифровой модели, предусматривающей автоматизированную генерацию заданий, становится не просто желательным, а стратегически необходимым.

Объектом исследования является цифровая инфраструктура независимой оценки квалификаций, функционирующая в рамках Национальной системы квалификаций (НСК). Предмет исследования — процессы проектирования и автоматизации генерации оценочных средств с использованием методов искусственного интеллекта, находящиеся на этапе концептуальной и прототипной проработки.

Методологической основой исследования выступают положения системного подхода (Л. Берталанфи 1969; В.Г. Афанасьев 1980) и современные концепции архитектурного моделирования информационных систем (В.А. Сухомлин 2015; М.А. Шубин 2017). В качестве теоретической базы также использованы труды в области построения интеллектуальных обучающих систем

(F. Chollet 2017; Goodfellow, I., et al. 2016) и обработки естественного языка (Д. Джурафски, Дж. Х. Мартин 2008). На текущем этапе осуществляется концептуальное моделирование с использованием методов анализа требований, построения архитектуры программных решений и разработки прототипов на основе библиотек машинного обучения (spaCy, scikit-learn).

Архитектура и структура ИИ-модуля

Ниже представлена функциональная схема проектируемого ИИ-модуля (Рисунок 1), интегрируемого в ПМК «Оценка квалификаций». Схема отражает ключевые компоненты системы и их взаимодействие:

Проектируемый ИИ-модуль предполагается как программный компонент, который может быть встроен в ПМК «Оценка квалификаций». На вход модуль будет получать текст профессионального стандарта и квалификации, из которых с помощью методов NLP (Natural Language Processing) будут извлекаться ключевые трудовые действия и компетенции. Далее, на основе ша-

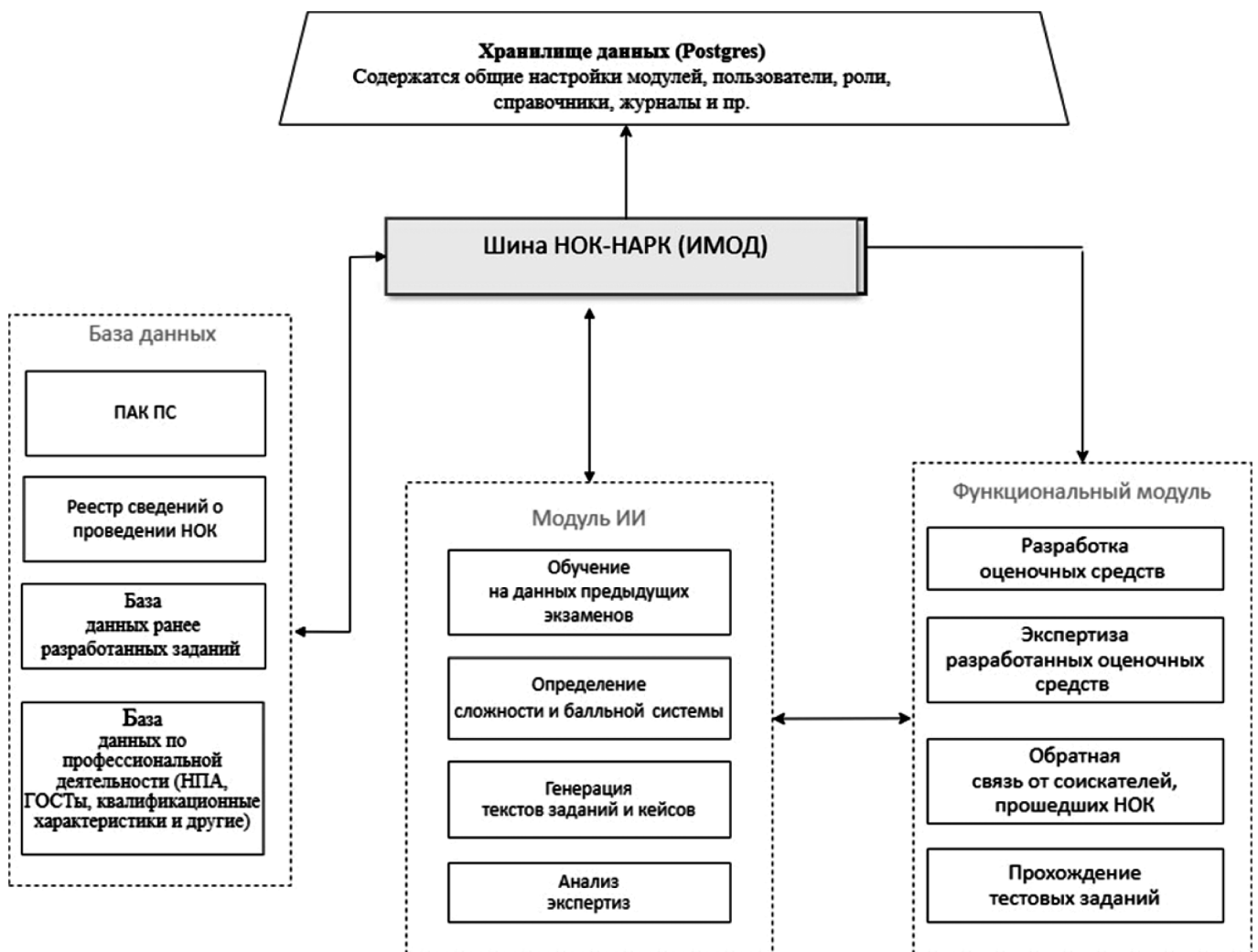


Рис. 1. Архитектура ИИ-модуля для системы

блонных конструкций планируется формирование заданий — как теоретических, так и ситуационных. Завершающим этапом станет классификация заданий по уровням сложности с использованием алгоритмов кластеризации.

На основании представленной архитектуры (см. рисунок выше), в состав модуля предполагается включить следующие ключевые блоки, обеспечивающие обработку, анализ и интеграцию информации:

1. Подсистема загрузки и предварительной обработки профессиональных стандартов и квалификаций из реестров и внешних источников;
2. Механизм семантического анализа (NLP), включающий обработку текстов, извлечение ключевых сущностей, категорий и связей;
3. Генератор текстов заданий (task-builder), создающий структуры теоретических и практических кейсов на основе шаблонов и данных анализа;
4. Оценщик сложности (difficulty predictor), применяющий методы кластеризации и статистического анализа для определения уровня заданий;
5. Интерфейс интеграции с внешними цифровыми платформами (ПМК, реестры НОК, системы прокторинга и онлайн-экзаменов), обеспечивающий двустороннюю передачу и верификацию данных.

Планируемые результаты и критерии оценки

В процессе опытной эксплуатации планируется протестировать модуль на ограниченной выборке профессиональных стандартов и получить экспертную оценку качества сгенерированных заданий. В качестве ключевых критериев эффективности предполагается использовать:

- время генерации заданий по сравнению с ручной разработкой (например, ручное создание одного полного комплекта оценочного средства занимает в среднем от 40 до 60 часов, тогда как автоматизированная генерация предполагается в пределах 3–5 минут);
- полнота покрытия профессиональных компетенций (на основе анализа не менее 20 профстандартов с сопоставлением извлеченных компетенций с утвержденными описаниями в реестре);
- соответствие уровню квалификаций (сравнение с текущей структурой Национальной рамки квалификаций — НРК, охват уровней 1–9);
- экспертная оценка применимости заданий в рамках НОК (планируется привлечение не менее 10 отраслевых экспертов, использующих 5-балльную шкалу, где приемлемым результатом считается средняя оценка не ниже 4,0).

Предварительный прогноз показывает, что внедрение модуля может потенциально сократить затраты сле-

дующим образом. Согласно текущим нормативам и наблюдениям, разработка одного комплекта оценочного средства, включающего 160 заданий теоретического этапа и 6 заданий практического этапа, в ручном режиме обходится в среднем в 1200000 рублей. При этом средняя стоимость разработки одного теоретического задания составляет 6500–7000 рублей, а одного практического — от 50000 до 80000 рублей, что обусловлено их трудоемкостью и глубокой проработкой методических материалов. Таким образом, при необходимости разработки недостающих оценочных средств по 500 квалификациям совокупный бюджет ручного подхода может достигать 600 миллионов рублей.

Предполагается, что автоматизация позволит сократить стоимость генерации одного комплекта оценочного средства до 50000–100000 рублей, включая экспертную верификацию и тестирование. Это означает потенциальную экономию бюджета в размере до 500 миллионов рублей на весь пул квалификаций, требующих ОС. При этом временные затраты на создание одного комплекта сократятся с 2–3 месяцев до 2–3 дней, что радикально повышает гибкость системы НОК и позволяет своевременно реагировать на изменения в профстандартах. Таким образом, применение ИИ-технологий обосновано не только методологически, но и экономически.

Научная новизна

Научная новизна исследования заключается в обосновании подхода к разработке ИИ-модуля для автоматизации генерации оценочных средств, адаптированного к особенностям российской системы НОК. Предложена концептуальная архитектура решения и алгоритмы, соответствующие структуре профессиональных стандартов и требованиям к заданиям в рамках ПМК.

Ограничения и направления дальнейших исследований

Ограничениями на текущем этапе являются отсутствие полной выборки тестов, невозможность прямого тестирования качества на соискателях, а также зависимость от структурированности исходных данных профстандартов. В дальнейшем предполагается апробация прототипа на платформе ПМК «Оценка квалификаций» (kos-nark.ru) и интеграция с системой онлайн-экзамена (ok.nark.ru).

Заключение

В рамках данного исследования была сформулирована и обоснована концепция модуля искусственного интеллекта, ориентированного на автоматизацию процессов разработки оценочных средств в рамках

независимой оценки квалификаций. Полученные теоретические положения и архитектурные решения демонстрируют, что интеграция ИИ в программно-методический комплекс «Оценка квалификаций» способна

радикально изменить подход к проектированию заданий: сократить временные и финансовые издержки, обеспечить масштабируемость и повысить прозрачность процедур оценки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берталанфи Л. фон. Общая теория систем: Очерк, проблемы, результаты / Л. фон Берталанфи. — М.: Прогресс, 1969. — 280 с.
2. Chollet F. Deep Learning with Python. — Greenwich, CT: Manning Publications Co., 2017. — 384 p.
3. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. — Cambridge, MA: MIT Press, 2016. — 800 p. — ISBN 978-0-262-03561-3.
4. Афанасьев В.Г. Системность и общество / В.Г. Афанасьев. — М.: Политиздат, 1980. — 264 с.
5. Будро Дж., Джесутасан Р. Реинжиниринг бизнеса. Как грамотно внедрить автоматизацию и искусственный интеллект / пер. с англ. Е. Милицкая; науч. ред. И. Беличева. — М.: Альпина Паблишер, 2019. — 292 с.
6. Бамбуров В.А. Применение технологий искусственного интеллекта в корпоративном управлении / В.А. Бамбуров // Государственная служба. — 2018. — № 3 (113). — С. 23–28.
7. NLP: что это такое и как она работает [Электронный ресурс] // skillbox: [сайт]. — URL: <https://skillbox.ru/media/code/nlp-cto-eto-takoe-i-kak-ona-rabotaet/> (дата обращения: 24.04.2025).
8. How do Big data and AI work together? [Электронный ресурс] // geeksforgeeks: [сайт]. — URL: <https://www.geeksforgeeks.org/how-do-big-data-and-ai-work-together/> (дата обращения: 24.04.2025).
9. Джурафски Д., Мартин Дж. Х. Обработка речи и языка: Введение в обработку естественного языка, вычислительную лингвистику и распознавание речи. — 2-е изд. — Верхний Сэдл-Ривер, Нью-Джерси: Прентис-Холл, 2008. — 988 с. — ISBN 978-0-13-187321-6.
10. Доклад о развитии независимой оценки квалификации в 2023 году // Национальное агентство развития квалификаций. — URL: <https://nark.ru/upload/iblock/3da/k2x1d6anw302laz4zxx49n21tlhrlb2j/doklad2023.pdf> (дата обращения: 24.04.2025).
11. Попова Е.В., Пахомова Э.А. Цифровая трансформация экономических процессов компаний / ООО «Си-т Инвест». — 2021.
12. Приказ Минтруда России от 01.11.2016 № 601н «Об утверждении Положения о разработке оценочных средств для проведения независимой оценки квалификации» // КонсультантПлюс. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_210077/ (дата обращения: 24.04.2025).
13. Сборник методических рекомендаций «Разработка и применение оценочных средств для проведения профессиональных экзаменов» // URL: <https://kos-nark.ru/storage/app/uploads/public/658/536/742/658536742fdf6302323361.pdf> (дата обращения: 24.04.2025).
14. Сухомлин В.А. Методология и технологии создания информационных систем. — М.: Финансы и статистика, 2015. — 328 с.
15. Федеральный закон от 03.07.2016 № 238-ФЗ «О независимой оценке квалификации» // КонсультантПлюс. — URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_200485/ (дата обращения: 24.04.2025).
16. Шубин М.А. Архитектура корпоративных информационных систем: теория и практика проектирования. — М.: РадиоСофт, 2017. — 312 с.

© Феклисов Владимир Игоревич (vfeklisov@nark.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РОЛЬ БЛОКЧЕЙНА В СОЗДАНИИ УСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ДАННЫХ

THE ROLE OF BLOCKCHAIN IN CREATING SUSTAINABLE DATA PROTECTION SYSTEMS

K. Khananov

Summary. Blockchain technology has radically changed approaches to storing, managing, and protecting information. Its key features — decentralization, openness of the system and resistance of records to changes — create fundamentally new opportunities for ensuring digital security. This article analyzes the possibilities of integrating blockchain solutions into the field of data protection: the basic principles of the technology, operating algorithms, practical examples of implementation, as well as the associated advantages and limitations are examined. Based on industry cases, the article demonstrates the transformative impact of blockchain on countering cyber risks, emphasizing its role as a tool for creating reliable security systems in the face of growing digital threats.

Keywords: data, blockchain, data security, cybersecurity, cryptography, decentralization.

Хананов Кирилл Русланович

Аспирант, Российская академия народного хозяйства
и государственной службы
при Президенте Российской Федерации
mr.hananov@gmail.com

Аннотация. Блокчейн-технология кардинально изменила подходы к хранению, управлению и защите информации. Ее ключевые особенности — децентрализация, открытость системы и устойчивость записей к изменениям — создают принципиально новые возможности для обеспечения цифровой безопасности. В данной статье анализируются возможности интеграции блокчейн-решений в сферу защиты данных: исследованы базовые принципы технологии, алгоритмы функционирования, практические примеры внедрения, а также связанные с этим преимущества и ограничения. На основе отраслевых кейсов статья демонстрирует трансформационное влияние блокчейна на противодействие киберрискам, подчеркивая его роль как инструмента для создания надежных систем безопасности в условиях растущих цифровых угроз.

Ключевые слова: данные, блокчейн, безопасность данных, кибербезопасность, криптография, децентрализация.

Введение

Технология блокчейн быстро трансформирует ландшафт безопасности данных. Отходя от централизованных систем, блокчейн предлагает надежный и защищенный от несанкционированного доступа подход к защите данных. Быстрая оцифровка информации и экспоненциальный рост генерации данных потребовали надежных механизмов безопасности. Традиционные централизованные системы становятся все более уязвимыми для утечек данных, несанкционированного доступа и кибератак. Технология блокчейн, впервые концептуализированная в 2008 году с появлением биткоина, предлагает децентрализованный подход к управлению данными и безопасности, потенциально устраняя многие ограничения традиционных методов.

Анализ литературы

Основной целью статьи является исследование применения технологии блокчейн в области безопасности данных. Это включает в себя понимание ее основных принципов, изучение различных функций безопасности и анализ ее применения в различных секторах для защиты целостности и конфиденциальности данных. Технология блокчейн широко используется для повышения

безопасности данных во многих различных областях. Она используется для защиты данных беспроводных датчиков в сетях IoT, обеспечивая конфиденциальность и предотвращая кражу [1]. Кроме того, системы на основе блокчейна обеспечивают безопасный обмен данными для приложений IoT, уделяя особое внимание конфиденциальности данных, анонимности и подотчетности без необходимости в доверенных сторонах [2]. В секторе здравоохранения предлагается децентрализованная безопасность на основе блокчейна (BCDS) с Crypto-Proof of Stake (CPos) для защиты персональных медицинских записей от несанкционированного доступа и утечки ключей, тем самым обеспечивая целостность и аутентификацию данных [3]. Кроме того, механизмы, вдохновленные блокчейном, интегрируются в защищенные системы обработки данных датчиков для обеспечения контроля доступа, неизменности и защиты от несанкционированных изменений, тем самым повышая общую безопасность и целостность данных [4]. Кроме того, фреймворк Access Control Enabled Blockchain (ACE-BC) использует механизмы шифрования атрибутов и контроля доступа для повышения безопасности и конфиденциальности данных в сетях обмена информацией о безопасности, тем самым повышая конфиденциальность и эффективность данных [5]. Технология блокчейн важна для улучшения мер безопасности данных с помощью различных

инновационных методов. Например, фреймворк Access Control Enabled Blockchain (ACE-BC) использует методы шифрования атрибутов и механизмы контроля доступа для повышения безопасности данных в обмене информацией о кибербезопасности (CIS) [6]. Аналогичным образом, модель децентрализованной безопасности на основе блокчейна (BCDS) использует доказательство доли владения (CPoS) и политику агрегации ключей главного узла (MNKAP) для надежной аутентификации и защиты конфиденциальных данных в пуле. Персональная медицинская карта (PHR) [7]. Кроме того, использование блокчейна для защиты журналов доступа обеспечит целостность и надежность аутсорсинговых данных за счет использования его функций безопасности и неизменности [8]. Стираемая модель иерархического контроля доступа на основе блокчейна повышает безопасность данных, позволяя владельцам данных определять политики доступа и контролировать изменения с помощью шифрования на основе атрибутов и техники хеширования хамелеон, обеспечивая эффективный и безопасный обмен данными [9]. Эти подходы демонстрируют, как технология блокчейна значительно улучшает меры безопасности данных в различных приложениях [10].

Теоретические основы

Блокчейн — это технология распределенного реестра, которая обеспечивает безопасное, прозрачное и защищенное от несанкционированного доступа ведение записей. Каждый блок содержит список транзакций и криптографически связан с предыдущим блоком, образуя цепочку. Децентрализованная природа блокчейна означает, что ни одна организация не контролирует всю сеть, что повышает безопасность и доверие.

Основные компоненты.

1. Децентрализация: в отличие от централизованных баз данных, блокчейн работает по одноранговой схеме, где каждый участник (хаб) включает дубликат полного блокчейна.
2. Неизменяемость: информация не может быть изменена или стерта после того, как она внесена в блокчейн. Эта постоянство достигается с помощью криптографического хеширования и инструментов соглашения.
3. Прозрачность: все коммуникации в блокчейне видны всем участникам, что подтверждает прозрачность и ответственность.
4. Механизмы консенсуса: многочисленные процессы (например, Proof of Work, Proof of Stake) достигают компромисса между узлами, аутентифицируя и блокируя коммуникации.

Типы блокчейнов.

1. Публичный блокчейн: открыт для всех; участники могут читать, писать и проверять блокчейн.

2. Частный блокчейн: ограниченный доступ; только авторизованные участники могут взаимодействовать с блокчейном.
3. Консорциумный блокчейн: контролируется группой организаций; доступ разделен между консорциумом организаций.

Функции безопасности блокчейна

Криптографическое хеширование

Каждый блок в блокчейне содержит три ключевых элемента: криптографический хеш предыдущего блока, временную метку и данные транзакции. Хеш-функция гарантирует целостность информации, генерируя уникальный идентификатор (хеш) для любого набора входных данных. Даже минимальное изменение в данных приводит к полному изменению хеша, что мгновенно сигнализирует о попытке несанкционированного вмешательства.

Для подтверждения транзакций и поддержания согласованности реестра блокчейн использует алгоритмы соглашений. Основные из них:

1. Proof-of-Work (PoW, «Доказательство работы») — майнеры решают сложные математические задачи для валидации транзакций и создания новых блоков. Процесс требует значительных вычислительных ресурсов, что делает атаки на сеть экономически невыгодными.
2. Proof-of-Stake (PoS, «Доказательство доли») — валидаторы выбираются на основе количества криптовалюты, которую они «замораживают» в качестве залога. Этот метод потребляет меньше энергии по сравнению с PoW.
3. Delegated Proof-of-Stake (DPoS) — участники сети голосуют за делегатов, которые проверяют транзакции от их имени, объединяя преимущества PoW и PoS.

Отсутствие централизованного управления исключает риски, связанные с единой точкой отказа. Данные дублируются на множестве узлов сети, что обеспечивает их сохранность даже при компрометации части системы.

Также в блокчейне используют смарт-контракты — это программные алгоритмы, автоматически исполняющие условия соглашений при наступлении заданных событий. Они минимизируют человеческое вмешательство, снижая риски ошибок и мошенничества.

Применение блокчейна в защите данных

Блокчейн позволяет хранить данные в распределенной сети, где информация не сосредоточена в одном хранилище. Такой подход сокращает риск утечек и не-

санкционированного доступа, так как злоумышленнику потребуется взломать большинство узлов одновременно.

Благодаря неизменности и прозрачности блокчейн-технология становится оптимальным решением для гарантии достоверности информации. Все изменения фиксируются в публичном реестре, что позволяет участникам сети оперативно выявлять попытки манипуляций. Это свойство делает блокчейн эффективным инструментом для подтверждения аутентичности данных, исключая возможность их несанкционированного изменения после записи в систему.

Блокчейн-решения трансформируют подходы к управлению цифровыми идентификаторами, предлагая распределенное и защищенное хранение персональных данных. Пользователи получают возможность самостоятельно контролировать свою идентификационную информацию, что снижает риски краж и мошенничества. Среди ключевых возможностей таких систем:

1. Децентрализованные идентификаторы (DID) — уникальные цифровые ID, создаваемые и управляемые самими пользователями без участия посредников.
2. Самоуправляемая идентификация — полный контроль над предоставлением и отзывом доступа к личным данным, минуя централизованные органы.

Блокчейн обеспечивает безопасность как финансовых, так и нефинансовых операций, создавая прозрачную и не редактируемую историю всех действий. Это позволяет участникам проверять легитимность транзакций, исключая ошибки и подлоги. Примеры применения:

1. Криптовалюты (Bitcoin, Ethereum) — использование блокчейна для шифрования и валидации операций с цифровыми активами.
2. Цепочки поставок — отслеживание происхождения товаров и подтверждение их подлинности на каждом этапе логистики.

Неизменность данных в блокчейне упрощает соблюдение законодательных требований и проведение аудиторских проверок. Организации могут использовать технологию для:

- Ведения точных журналов операций, соответствующих нормативным стандартам.
- Автоматизации аудита: проверяющие получают доступ к достоверной истории транзакций, что минимизирует риски ошибок и фальсификаций.

В сфере здравоохранения блокчейн позволяет безопасно хранить и передавать электронные медицинские карты пациентов, ограничивая доступ к ним только авторизованным лицам (врачам, лабораториям, страховым компаниям). Технология повышает конфиденциаль-

ность, предотвращает утечки и улучшает взаимодействие между учреждениями, обеспечивая актуальность данных для всех участников процесса лечения.

Блокчейн создает прозрачную и неизменяемую систему регистрации прав на интеллектуальную собственность. Авторы могут фиксировать временные метки создания контента, патентов или дизайнов в блокчейне, что служит юридическим доказательством их авторства. Это упрощает разрешение споров и предотвращает незаконное использование объектов ИС.

Реальные кейсы внедрения

Разработанная MIT система MedRev использует блокчейн для управления электронными медкартами. Децентрализованное хранение данных позволяет пациентам гибко предоставлять доступ к своей истории болезней клиникам или исследователям, сохраняя контроль над информацией. Решение устраняет дублирование записей, снижает риск ошибок и повышает доверие к медицинским данным.

Платформа IBM Food Trust применяет блокчейн для отслеживания цепочек поставок продуктов питания. Каждый этап — от фермы до магазина — фиксируется в реестре, что исключает подмену данных о качестве, сроке годности или происхождении товаров. Это сокращает случаи фальсификаций и позволяет мгновенно выявлять источники заражения продукции.

Протокол Ripple оптимизирует международные платежи за счет блокчейна, обеспечивая переводы за секунды с минимальными комиссиями. Децентрализованная сеть валидаторов гарантирует безопасность операций, а встроенные алгоритмы предотвращают двойное расходование средств. Банки и платежные системы используют Ripple для снижения издержек и повышения надежности транзакций.

Проблемы и ограничения

Основным вызовом для блокчейн-систем остается ограниченная пропускная способность. Рост числа транзакций приводит к увеличению нагрузки на сеть, замедлению обработки операций и росту комиссий. Для решения этой проблемы разрабатываются технологии:

- **Шардинг** — горизонтальное разделение сети на части для параллельной обработки данных.
- **Оффчейн-транзакции** — выполнение операций вне основного блокчейна с последующей фиксацией итогов.
- **Решения второго уровня** (например, Lightning Network) — надстройки, ускоряющие и удешевляющие микроплатежи.

Правовая неопределённость замедляет интеграцию блокчейна. Разрозненные требования разных стран к конфиденциальности данных, AML-политикам (противодействие отмыванию) и налогообложению крипто активов создают сложности для бизнеса. Например, в ЕС действует регламент MiCA, а в США — правила SEC, что усложняет кросс-границные операции [11].

Другой проблемой развития технологии блокчейн остается энергопотребление. Алгоритмы Proof of Work (PoW), используемые в Bitcoin и ранее в Ethereum, требуют огромных вычислительных мощностей, что критикуется за негативное влияние на экологию [11]. Альтернативы:

- Proof of Stake (PoS) — Ethereum 2.0 сократил энергозатраты на 99.95 % после перехода на PoS.
- Другие алгоритмы — Delegated Proof of Stake (DPoS), Proof of Authority (PoA).

Взаимодействие между различными сетями блокчейнов и существующими системами является серьезной проблемой. Обеспечение бесперебойной связи и обмена данными между различными платформами имеет важное значение для широкого внедрения технологии блокчейна.

Несмотря на криптографическую защиту, риски сохраняются [12]:

1. Уязвимости смарт-контрактов — Ошибки в коде (как в случае взлома DAO в 2016 году) позволяют злоумышленникам похищать средства.
2. Атака 51 % — Захват контроля над большинством вычислительных мощностей сети для изменения транзакций.
3. Риски управления ключами — Утрата приватного ключа означает безвозвратную потерю доступа к активам. Решение: аппаратные кошельки (Ledger, Trezor) и мультиподпись.

Будущее блокчейн-технологий

Совершенствование механизмов согласования данных — ключевой вектор развития. Гибридные модели, такие как Delegated Proof of Stake (DPoS) и Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT), повышают скорость обработки транзакций и устойчивость сетей к сбоям. Например, переход Ethereum на PoS уже сократил энергопотребление на 99 %, сделав блокчейн экологичнее [12]. Синергия блокчейна с ИИ, IoT и квантовыми вычислениями открывает новые горизонты [10]:

- ИИ + блокчейн — аудит алгоритмов машинного обучения для прозрачности решений.

- IoT + блокчейн — защищённые децентрализованные сети для умных устройств (например, отслеживание поставок в реальном времени).
- Квантовые решения — разработка криптографии, устойчивой к квантовым атакам.

Усилия по разработке стандартизированных протоколов и структур для технологии блокчейнов могут улучшить совместимость между различными сетями блокчейнов и существующими системами. Это может способствовать более широкому принятию и интеграции решений блокчейнов в различных отраслях.

Технологии ZKP (Zero-Knowledge Proofs), и гомоморфное шифрование позволяют проверять данные без раскрытия содержимого. Это решает дилемму между прозрачностью блокчейна и конфиденциальностью пользователей [11].

По мере развития технологии блокчейна нормативные рамки, скорее всего, будут адаптироваться для решения ее уникальных проблем и возможностей. Четкие и последовательные правила могут обеспечить благоприятную среду для роста и принятия решений на основе блокчейна.

Заключение

Блокчейн-технология демонстрирует революционный потенциал в сфере защиты данных, предлагая инновационные решения для различных отраслей. Базируясь на принципах децентрализации, неизменности записей и прозрачности операций, она формирует устойчивую основу для противодействия кибератакам, фальсификациям и несанкционированному вмешательству.

Несмотря на текущие вызовы — ограничения в скорости обработки транзакций, правовую неопределённость и высокие энергозатраты — активные исследования и инновационные подходы (переход на PoS, шардинг) постепенно нивелируют эти барьеры.

Перспективы технологии очевидны: интеграция с ИИ и IoT, внедрение стандартов интероперабельности и развитие «зелёных» алгоритмов консенсуса открывают новую эру в управлении цифровыми активами. Блокчейн не просто улучшает существующие системы безопасности — он переопределяет стандарты хранения, обработки и защиты информации, становясь краеугольным камнем цифровой трансформации XXI века.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hsiao S.J., Sung W.T. Повышение кибербезопасности с использованием технологии блокчейна на основе слияния данных IoT. *IEEE Internet Things J.* 2023;10(1):486–98.
2. Wu T., Wang W., Zhang C., Zhang W., Zhu L., Gai K. и др. Анонимный обмен данными на основе блокчейна с ответственностью за Интернет вещей. *IEEE Internet Things J.* 2023;10(6):5461–75.
3. Deepika K.M., Murthy M. Децентрализованная безопасность на основе блокчейна с использованием крипто-доказательства доли для защиты конфиденциальных персональных медицинских записей. *Adv Eng Software.* 2022; 173:103235.
4. Zhao W., Aldama I.M., Gangwani P., Joshi S., Upadhyay H., Lagos L. Система безопасной обработки и регистрации данных зондирования с использованием блокчейна. *IEEE Access.* 2023;11.
5. Alharbi A. Применение структуры блокчейна с поддержкой контроля доступа (ACE-BC) для управления безопасностью данных в системе CIS. *Sens.* 2023;2023(6):3020
6. Manogaran G., Alazar M., Hsu C.H. Модель безопасного обмена данными с использованием блокчейна для интеллектуальных отраслей на основе Интернета вещей. *IEEE Trans Reliability.* 2022;71(1):348–58.
7. Benkhaddra I., Kumar A., Bensalem Z.E., Hang L. Безопасная передача секретных данных с использованием методов встраивания на основе оптимизации в блокчейн. *Expert Syst Appl.* 2023; 211:118469.
8. Sifah E.B., Xia Q., Agyekum K.O., Xia H., Smahi A., Gao J. Подход на основе блокчейна к обеспечению происхождения аутсорсинговых облачных данных в экосистеме совместного использования. *IEEE Syst J.* 2022;16(1):1673–84.
9. Ram B., Yadav S., Singh K.K. Применение облачных вычислений в библиотечных службах. В: 5-й Международный симпозиум по новым тенденциям и технологиям в библиотеках и информационных службах; 2018. стр. 75–8.
10. Hosen A.S., Yoon B. Атаки на безопасность блокчейна, проблемы и решения для будущей распределенной сети Интернета вещей. *IEEE Access.* 2017.
11. Estevam G.; Palma, L.M.; Silva, L.R.; Martina, J.E.; Виджил, М. Точная и децентрализованная временная метка с использованием смарт-контрактов на блокчейне Ethereum. *Inf. Process. Manag.* 2021,58, 102471
12. Чжан С.; Ли Дж. Х. Анализ основных консенсусных протоколов блокчейна. *ICT Express* 2020,6, 93–97.

© Хананов Кирилл Русланович (mr.hananov@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ (IIOT) НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВЫБРОСОВ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА (CO₂)

USING THE INTERNET OF THINGS (IIOT) IN INDUSTRIAL PRODUCTION TO MONITOR CARBON DIOXIDE (CO₂) EMISSIONS

K. Khananov

Summary. This research paper examines the application of the Industrial Internet of Things (IIoT) to monitor, measure, and visualize CO₂ emission reductions in real time in industrial and environmental applications. Key challenges of using the Internet of Things are identified, including interoperability, data security, and system scalability. The paper describes the challenges that enterprises face when using IIoT: issues of interoperability of heterogeneous hardware and software, ensuring reliable security of confidential and critical data transmitted over networks, and the complexity of scaling systems to cover large enterprises or distributed facilities. The paper highlights the need for an integrated approach to IIoT implementation to effectively manage the carbon footprint.

Keywords: industrial Internet of things (IIoT), CO₂ monitoring, real-time data processing, carbon footprint monitoring, air quality, security, and privacy in IIoT, emissions management, predictive maintenance, edge computing, machine learning, blockchain technology, smart buildings, smart cities, environmental sustainability.

Хананов Кирилл Русланович

Аспирант, Российская академия народного хозяйства
и государственной службы
при Президенте Российской Федерации
mr.hananov@gmail.com

Аннотация. В научной статье рассматривается применение промышленных Интернет вещей (IIoT) для мониторинга, измерения и визуализации в режиме реального времени сокращения выбросов CO₂ в промышленных и экологических областях. Выявлены ключевые проблемы использования Интернет вещей, которые включают в себя совместимость, безопасность данных и масштабируемость системы. Описаны проблемы, с которыми сталкиваются предприятия при использовании IIoT: вопросы совместимости разнородного оборудования и программного обеспечения, обеспечение надежной безопасности конфиденциальных и критически важных данных, передаваемых по сетям, а также сложности масштабирования систем для охвата крупных предприятий или распределенных объектов. Статья подчеркивает необходимость комплексного подхода к реализации IIoT для эффективного управления углеродным следом.

Ключевые слова: промышленный Интернет вещей (IIoT), мониторинг CO₂, обработка данных в реальном времени, мониторинг углеродного следа, качество воздуха, безопасность и конфиденциальность в IIoT, управление выбросами, прогностическое обслуживание, периферийные вычисления, машинное обучение, технология блокчейн, умные здания, умные города, экологическая устойчивость.

Введение

Промышленный Интернет вещей (IIoT) представляет собой технологическую платформу, обеспечивающую интеграцию интернета вещей (IoT) в производственные процессы. Современные системы IIoT предоставляют возможность сбора и анализа данных о качестве атмосферного воздуха и динамике выбросов диоксида углерода (CO₂), что способствует оптимизации экологической устойчивости, операционной эффективности и надежности промышленных объектов [1, 2]. Ключевым элементом архитектуры таких систем выступают сенсорные устройства, реализующие принципы Industry 4.0 и Industry 5.0 посредством межмашинного взаимодействия в режиме реального времени [2].

Современные исследования демонстрируют, что комбинация периферийных и облачных вычислений, методов машинного обучения (ML), искусственного ин-

теллекта (ИИ), а также систем безопасного управления данными позволяет создавать интеллектуальные платформы для непрерывного мониторинга эмиссии CO₂ и внедрения устойчивых производственных практик [2, 3]. Применение беспроводных технологий, включая LoRaWAN, обеспечивает масштабируемый мониторинг газовых выбросов в распределенных промышленных системах [4, 5].

Важным аспектом является интеграция IIoT с инструментами визуализации данных, что повышает доступность экологической информации для принятия управленческих решений в секторах производства, логистики и энергетики [6–9]. Актуальность мониторинга CO₂ обусловлена не только требованиями регуляторных органов (например, директивами ЕС, предусматривающими финансовые санкции за несоблюдение нормативов [10]), но и необходимостью минимизации рисков для здоровья персонала, связанных с недостаточной вентиляцией помещений.

Когнитивные системы на базе IIoT позволяют трансформировать первичные данные о выбросах в структурированные цифровые метрики, что упрощает идентификацию источников загрязнения, прогнозирование экологических рисков и разработку стратегий снижения углеродного следа промышленных предприятий [4, 9, 11, 12].

Методология

Для анализа преимуществ и проблем внедрения систем IIoT методология включает обзор литературы, технический анализ и практические примеры использования. Литература основана на материалах баз данных, таких как IEEE Xplore, ScienceDirect и Google Scholar, для сбора разнообразной информации, включая теоретические статьи, примеры использования и практические приложения. Определенные критерии использовались для отбора и оценки собранной литературы на основе ее соответствия целям исследования.

Анализ литературы

Литература была разделена на категории по общим темам и разделам, и для уменьшения смещения данных использовалась триангуляция из нескольких источников. Чтобы глубже понять преимущества и ограничения систем IIoT и датчиков CO₂, был проведен технический анализ для сравнения производительности систем IIoT и практических реализаций. Сюда входила надежность скоростей обработки данных, аспекты безопасности и точность системы при обнаружении выбросов CO₂.

Теоретические основы

Современные системы Промышленного Интернета вещей (IIoT) интегрируют сенсорные устройства, методы анализа данных и беспроводные коммуникационные протоколы для оптимизации промышленных процессов и управления производственными активами [1, 2]. Режим реального времени в мониторинге выбросов CO₂ играет критическую роль в обеспечении энергоэффективности, производственной надежности и экологической устойчивости промышленных объектов [13, 14]. Архитектура дата-центров IIoT формирует концептуальную основу Индустрии 4.0/5.0, обеспечивая синергию между киберфизическими системами (CPS) и распределенными вычислительными ресурсами [15].

Структура типовой IIoT-платформы включает:

- Сенсорные узлы для сбора параметров эмиссии;
- Микроконтроллерные системы предварительной обработки данных;
- Гибридные вычислительные среды (edge-fog-cloud computing) для анализа, хранения и принятия решений в режиме реального времени [15].

Такая конвергенция технологий обеспечивает сквозную автоматизацию мониторинга углеродного следа в кросс-отраслевом контексте.

Современные методы детектирования CO₂ эволюционируют благодаря внедрению сенсоров нового поколения, таких как недисперсионные инфракрасные (NDIR) датчики, характеризующихся высокой точностью измерений и устойчивостью к внешним помехам [5]. Актуальным трендом является разработка компактных измерительных систем на базе микроконтроллерных платформ, интегрированных с мультисенсорными массивами [11].

Архитектура систем Промышленного Интернета вещей (IIoT), ориентированных на мониторинг, количественную оценку и визуализацию выбросов углерода (CO₂), представляет собой многоуровневую структуру, интегрирующую аппаратные и программные модули [1]. Ключевые компоненты включают:

- Сенсорные узлы: датчики CO₂ для непрерывного сбора данных по выбросам;
- Коммуникационные интерфейсы: протоколы передачи данных (LoRaWAN, ZigBee);
- Вычислительные платформы: алгоритмы предобработки (фильтрация шумов) и анализа (машинное обучение, регрессионные модели);
- Системы визуализации: дашборды для оперативного отображения метрик эмиссии.

Данная конфигурация обеспечивает сквозную интеграцию от сбора сырых данных до генерации аналитических инсайтов, критических для оптимизации экологического менеджмента.

Основными источниками данных выступают сенсорные устройства, являющиеся базовыми элементами IIoT-систем и обеспечивающими детектирование и количественную оценку параметров окружающей среды, включая концентрацию CO₂. Выбор сенсорных технологий определяется компромиссом между точностью, временем отклика, энергопотреблением и стоимостью. Интеграция сенсоров в IIoT-архитектуры позволяет реализовать:

- Дистанционный мониторинг через облачные платформы;
- Автоматизацию корректирующих действий на основе предиктивной аналитики [13].

Критическим аспектом интеграции сенсоров CO₂ в системы IIoT является выбор стратегии обработки данных, определяющий производительность и масштабируемость системы. В современных архитектурах применяются два подхода:

- Периферийные вычисления — локальная обработка данных вблизи источника генерации (сенсорные узлы, шлюзы), обеспечивают мини-

мальную задержку за счет локальной обработки данных без передачи в централизованные облака;

- Облачные вычисления — делегирование обработки на удаленные серверы с распределенными ресурсами. Оптимальное решение для задач, требующих масштабируемых вычислительных ресурсов и обработки больших данных (Big Data) в распределенных IIoT-средах.

Оба метода решают задачи анализа данных, но отличаются по ключевым метрикам: задержкам, энергоэффективности, стоимости эксплуатации. Ниже представлены основные преимущества и ограничения обоих методов (Табл.1).

Таблица 1.

Преимущества и ограничения периферийных и облачных вычислений

Наименование	Периферийные вычисления	Облачные вычисления
Преимущества	Снижение сетевой нагрузки, Повышение отказоустойчивости, Соблюдение нормативов GDPR	расширенная аналитика (кластерный анализ) централизованное управление, гибридные архитектуры для балансировки нагрузки
Ограничения	Ограниченная вычислительная мощность; Дефицит памяти	Задержки передачи данных, Риски кибербезопасности

Обеспечение передачи данных между компонентами систем Промышленного Интернета вещей (IIoT) и вычислительными платформами (периферийные/облачные серверы) представляет собой критически важный функциональный модуль, определяющий производительность и надежность экологического мониторинга. Для реализации данного процесса применяются беспроводные коммуникационные протоколы, выбор которых осуществляется на основе следующих параметров [4]:

- Пропускная способность;
- Радиус действия;
- Энергоэффективность.

Соблюдение регламентов по уровню CO₂ (например, директивы ЕС по промышленной эмиссии) и требований безопасности труда (стандарт ISO 45001) требует реализации аналитических алгоритмов с задержкой менее 200 мс. В условиях промышленных объектов с повышенными требованиями к кибербезопасности рекомендованы следующие основные меры: сквозное шифрование и аутентификация данных [4, 12].

Исследования показали, что модели ИИ поддерживают системы IIoT с производительностью и точностью

данных, что делает такие подходы более эффективными, чем предыдущие системы. Кроме того, ИИ может также предоставлять такие функции, как экспертные предложения на основе данных системы IIoT, и способствовать улучшенному анализу при работе с обширными наборами данных [8,10]. Алгоритмы МО также могут быть интегрированы для выявления потенциальных аномалий в потоках данных до того, как они станут критическими. Соответственно, алгоритмы МО могут использоваться для поддержки анализа исторических данных и прогнозистических моделей, которые могут прогнозировать концентрации CO₂ на основе факторов окружающей среды. Кроме того, методы МО могут помочь поддерживать автоматизированные ответы для обработки изменений выбросов CO₂, такие как запуск вентиляции путем отправки оповещений в реальном времени менеджерам объекта или поддержка с калибровками путем динамического прогнозирования и исправления дрейфов датчика CO₂ [8].

Визуализация данных в системах промышленного Интернета вещей

Инструменты визуализации данных являются важным компонентом архитектуры систем IIoT, обеспечивающим трансформацию «сырых» данных, полученных от сенсорных сетей мониторинга CO₂, в когнитивно-оптимизированные форматы. С помощью современных инструментов визуализации данные системы IIoT можно визуализировать в легко понятных форматах, таких как диаграммы, графики и тепловые карты. Различные инструменты визуализации, такие как Tableau, Power BI и другие специализированные панели управления данными, были разработаны для предоставления удобных интерфейсов для выходных данных системы IIoT.

Использование веб-панелей управления, работающих на смартфонах, планшетах или настольных компьютерах, является еще одним современным способом визуализации и демонстрации данных из систем IIoT [10,11]. Эти интерфейсы, работающие на основе веб-технологий, таких как HTML, CSS и JavaScript, позволяют пользователям и заинтересованным сторонам отслеживать выбросы CO₂ в реальном времени и управлять данными системы IIoT непосредственно в промышленных условиях.

Проблемы безопасности и конфиденциальности в системах IIoT

Интеграция систем IIoT в промышленные среды может представлять сложные проблемы безопасности, требующие внимания [15]. Проблемы безопасности включают уязвимости встроенного ПО устройств, небезопасные протоколы связи и управление несколькими взаимосвязанными устройствами. Кроме того, разнообразие систем IIoT и отсутствие стандартизированных

стандартов безопасности еще больше усложняют аспекты безопасности ландшафта систем IIoT. Физические системы в сочетании с цифровыми элементами управления особенно подвержены кибератакам, нарушают работу и потенциально могут нанести значительный ущерб. Однако решение этих проблем безопасности может обеспечить повышенную целостность данных и предотвратить несанкционированный доступ к данным, особенно при работе с конфиденциальной промышленной информацией [11].

Несмотря на стоящие проблемы, меры безопасности в последние годы достигли успехов. Эти достижения включают внедрение различных протоколов и методов безопасности для устранения рисков безопасности, связанных с системами IIoT, протоколами аутентификации и шифрованием [10]. Интеграция блокчейна в системы IIoT может создавать защищенные от несанкционированного доступа транзакции данных и поддерживать целостность данных. Более того, периферийные вычисления могут поддерживать протоколы безопасности, обрабатывая данные системы IIoT локально и тем самым сокращая объем данных, передаваемых по уязвимым сетям. Другие рекомендации включают развертывание систем обнаружения вторжений, регулярное обновление прошивки и принятие фреймворков безопасности, которые устраняют как аппаратные, так и программные уязвимости. Также разрабатываются платформы промежуточного программного обеспечения для облегчения интеграции и решения проблем взаимодействия между устройствами системы IIoT [10] и наоборот, внедрение систем предиктивного обслуживания, используемых глубокими алгоритмами машинного обучения для эффективного анализа данных из систем IIoT, также может обеспечить эффективность поддержки и функции безопасности системы.

При этом вопросы безопасности и конфиденциальности в системах IIoT имеют решающее значение для промышленных операций. Исследования показали, что системам IIoT нужны защищенные сети для защиты целостности данных, конфиденциальности и доступности [15]. Процедуры безопасности охватывают фреймворки обнаружения вторжений, протоколы аутентификации на основе криптографии и обнаружение вторжений на основе аномалий для ограниченных сетей IIoT.

Варианты использования

Как уже упоминалось, промышленный Интернет вещей (IIoT) представляет собой прогресс в повышении эффективности и производительности в различных промышленных областях [12]. Например, заводы используют системы IIoT для контроля состояния оборудования и оптимизации производства, сокращая время простоя и повышая эффективность [14].

Кроме того, используя системы IIoT и подключенные датчики для мониторинга производственных процессов, компании могут улучшить процедуры качества продукции и эффективно поддерживать меры безопасности сотрудников.

Мониторинг окружающей среды Системы IIoT могут контролировать окружающую среду, предоставляя данные в реальном времени о таких факторах, как состояние почвы, воздуха или воды. Например, в исследовании использовалась система IIoT для отслеживания условий выращивания грибов путем интеграции датчиков для мониторинга выбросов CO₂, влажности и температуры для обеспечения оптимальных условий роста и повышения производительности. В других исследованиях системы IIoT использовались для измерения влажности и уровня питательных веществ для упрощения методов ведения сельского хозяйства и эффективного поддержания экологических ресурсов [12, 13].

Заключение

В статье проанализированы возможности промышленного интернета вещей (IIoT) для мониторинга, анализа и визуализации уровней выбросов CO₂ в промышленности и окружающей среде. Реализация IIoT-систем обеспечивает непрерывный контроль качества воздуха и выбросов углекислого газа в режиме реального времени за счёт интеграции датчиков, алгоритмов обработки данных и инструментов визуализации [2, 4]. Применение передовых технологий, включая высокоточные сенсоры CO₂, методы слияния данных, искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение (МО), позволяет повысить точность измерений и оптимизировать управление эмиссиями в промышленных процессах [1].

Потенциал IIoT не ограничивается производственными объектами: такие системы могут быть адаптированы для сельского хозяйства, умных городов и управления зданиями, где контроль CO₂ критически важен для экологической устойчивости и социального благополучия [4, 8, 12].

Перспективные направления развития IIoT-платформ для мониторинга CO₂ включают:

1. Повышение энергоэффективности и масштабируемости решений, включая внедрение периферийных вычислений и блокчейн-технологий для обеспечения безопасности данных [9].
2. Интеграцию ИИ-сервисов и МО-алгоритмов для прогнозирования, обнаружения аномалий и предиктивного обслуживания систем [2].
3. Разработку стандартизированных протоколов связи и межплатформенных процессов, обеспечивающих совместимость устройств от разных производителей. Это позволит создать гибкие экосистемы для кросс-отраслевого управления выбросами [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Le T., Oktian Y., Kim H.: XGBoost для несбалансированных многоклассовых систем обнаружения вторжений промышленного Интернета вещей. *Sustainability* 14(14), 8707 (2022). <https://doi.org/10.3390/su14148707>
2. Mofidul R.B., Rahman M.H., Jang Y.M.: Система сбора данных об энергии в реальном времени, обнаружения аномалий и мониторинга: реализация защищенной, надежной и интегрированной глобальной инфраструктуры IIoT с периферийной и облачной ИИ. *Sensors* 22(22), 8980–8980 (2022). <https://doi.org/10.3390/s22228980>
3. Каур М., Хан М., Гупта С., Альсаиди А.: Внедрение блокчейна с сетями 5G для промышленного Интернета вещей: последние достижения, проблемы и потенциальные решения. *IEEE Access* 10, 981–997 (2022). <https://doi.org/10.1109/access.2021.3138754>
4. Матеев В., Маринова И.: Распределенная система Интернета вещей для мониторинга CO₂ с помощью LoRaWAN (2021). <https://doi.org/10.1109/ELECTRONICA52725.2021.9513682>
5. Дипан С., Бурадкар М., Акхила П., Кумар К.С., Шарма М.К. и Чакраварти М.К.: Прогностическое обслуживание с использованием ИИ для промышленных систем Интернета вещей. В: Труды 2024 г. (2024). <https://doi.org/10.1109/ACCAI61061.2024.10601983>
6. Бансод Н.В., Хор У.В.: Система мониторинга качества воздуха на основе Интернета вещей, стр. 1106–1114 (2021). <https://doi.org/10.48175/IJARSC-1536>
7. Sisinni E., Saifullah A., Han S., Jennehag U., Gidlund M.: Промышленный интернет вещей: вызовы, возможности и направления. *IEEE Trans. Ind. Inf.* 14(11), 4724–4734 (2018). <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2852491>
8. Wójcicki K., Biegańska M., Paliwoda B., Górna J.: Интернет вещей в промышленности: профилирование исследований, применение, вызовы и возможности — обзор. *Energies* 15(5), 1806 (2022). <https://doi.org/10.3390/en15051806>
9. Saragea Ş, Toma M., Micu D., Fratila G., Badea G.: Стратегия программного обеспечения для управления двигателем внутреннего сгорания и электродвигателем на гибридном электромобиле, оснащённом ремённым стартер-генератором и автоматизированной механической коробкой передач. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 1235(1), 012035 (2022). <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1235/1/012035>
10. Salhaoui M., Guerrero-González A., Arioua M., Ortiz F., Oualkadi A., Torregrosa C.: Интеллектуальная промышленная система мониторинга и управления IoT на основе БПЛА и облачных вычислений, применённая к бетонному заводу. *Датчики* 19(15), 3316 (2019). <https://doi.org/10.3390/s19153316>
11. Ullo S., Sinha G.: Достижения в области интеллектуальных систем мониторинга окружающей среды с использованием IoT и датчиков. *Датчики* 20(11), 3113 (2020). <https://doi.org/10.3390/s20113113>
12. Маулана Г.Г., Амина С., Берллиянто А.Н.: Внедрение системы мониторинга производства с использованием IIoT на основе мобильного приложения. *Журнал RESTI* 7(5) (2023). <https://doi.org/10.29207/resti.v7i5.5221>
13. Аль-Рубайе С., Кадхум Э., Ни К., Анпалаган А.: Промышленный Интернет вещей, движимый Платформа SDN для обеспечения устойчивости интеллектуальных сетей. *IEEE Internet Things J.* 6(1), 267–277 (2019). <https://doi.org/10.1109/jiot.2017.2734903>
14. Джамил Ф., Джаваид У., Хан В., Аман М., Перваиз Х., Янтти Р.: Обучение с подкреплением в сетях IIoT на базе блокчейна: обзор последних достижений и открытых проблем. *Устойчивость* 12(12), 5161 (2020). <https://doi.org/10.3390/su12125161>
15. Саркар А., Гош Д., Гангули К., Гош С., Саха С.: Исследование Интернета вещей для мониторинга и анализа CO₂ в реальном времени. *arXiv.org*, т. abs/2308.03780 (2023). <https://doi.org/10.48550/arxiv.2308.03780>

© Хананов Кирилл Русланович (mr.hananov@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ, НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ И ЭВОЛЮЦИЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА ТЕМПЕРАТУРЫ ТРАНСФОРМАТОРА

A HYBRID REINFORCEMENT LEARNING, FUZZY LOGIC, AND EVOLUTIONARY MODEL FOR TRANSFORMER TEMPERATURE FORECASTING

A. Chernikov

Summary. This paper presents a novel hybrid approach, FELAR, which integrates tabular Q-learning, socially oriented fuzzy logic, and genetic hyperparameter optimization to accurately predict the oil winding temperature of power transformers. Using the ETTh1 benchmark dataset, we demonstrate that the proposed architecture achieves performance comparable to or better than state-of-the-art transformer models. The hybridization enables effective adaptation to thermal inertia and seasonal variations without sacrificing computational simplicity, allowing for online fine-tuning on edge devices without GPU acceleration. Experimental analysis of the error distribution and forecast-vs-actual scatter plots highlights FELAR's robustness to right-skewed errors and overnight temperature dips, suggesting avenues for further calibration of fuzzy rule weights and evolution of strategy parameters.

Key words: FELAR, ETTh1, Q-learning, fuzzy logic, genetic optimization, transformer temperature forecasting.

Черников Александр Владимирович

аспирант, ФГБОУ ВО Московский государственный
технологический университет «Станкин»
aleksandrchernikov98@gmail.com

Аннотация. В статье представлен новый гибридный подход FELAR, который сочетает табличное Q-обучение, социально-ориентированную нечёткую логику и генетическую оптимизацию гиперпараметров для точного прогнозирования температуры масляной обмотки силового трансформатора. На примере эталонного набора ETTh1 демонстрируется, что предложенная архитектура достигает сопоставимых или лучших по сравнению с классическими трансформер-моделями. Гибридизация позволяет эффективно адаптироваться к термическим инерциям и сезонным колебаниям без потери вычислительной простоты, выполняя онлайн-дообучение на периферийных устройствах без GPU. Экспериментальный анализ распределения ошибок и диаграммы «прогноз—факт» подчёркивает устойчивость FELAR к правосторонней асимметрии и ночным провалам, открывая пути к дальнейшей калибровке нечётких весов и эволюции стратегий.

Ключевые слова: FELAR, ETTh1, Q-обучение, нечеткая логика, генетическая оптимизация, прогноз температуры трансформатора.

Введение

В статье представлен FELAR (Fuzzy-Evolutionary Learning for Adaptive Regulation) — гибридная модель интеллектуального управления, сочетающая обучение с подкреплением, нечеткую логику и эволюционные алгоритмы для решения задач прогнозирования и адаптивного регулирования в динамических средах. FELAR реализует агентно-ориентированный подход, в котором каждый агент обучается с использованием модифицированного Q-learning с учётом социального контекста: доверия, репутации и влияния. Эти параметры формализуются через систему нечеткой логики, обеспечивая устойчивость модели к шуму и неопределённости. Эволюционный механизм обеспечивает автоматическую настройку стратегий и гиперпараметров агентов, способствуя адаптации к изменяющимся условиям без необходимости полного переобучения.

Прогноз перегрева трансформаторов

Датасет Electricity Transformer Temperature (ETT) [1] задуман как эталон для проверки длинноразрешенных

моделей прогнозирования. Сырьё собиралось на силовых подстанциях одной из восточных провинций Китая; в нём регистрируется тепловое состояние масляной обмотки трансформатора и сопутствующие электрические нагрузки. Авторы выделили четыре конфигурации, различающиеся частотой дискретизации и номером станции: ETTh1, ETTh2 (hourly) и ETTm1, ETTm2 (15-minute). В экспериментах используется ETTh1 — часовая последовательность за два полных календарных года, с июля 2016 по июль 2018. За счёт частоты 1 ч массив содержит ровно $52024 \times 365 \times 2 = 17520$ отметок для каждой переменной.

Набор данных Electricity Transformer Temperature (ETT) был предложен в совместном исследовании с моделью Informer [2] как эталон для проверки алгоритмов, способных строить прогнозы на длительных временных горизонтах. Исходные данные собирались на силовых подстанциях в одном из восточных регионов Китая и включают показания температуры масла в обмотке трансформатора наряду с электрическими нагрузками. Авторы выделили четыре варианта выборки — ETTh1

и ETTh2 с часовым шагом, а также ETTm1 и ETTm2 с интервалом 15 минут. В наших экспериментах используется конфигурация ETTh1: два полных календарных года наблюдений (с июля 2016 по июль 2018), где при часовой дискретизации совокупность данных составляет ровно $24 \times 365 \times 2 = 17520$ временных меток для каждого из семи сенсорных каналов.

Перед квантованием все признаки приводятся к диапазону $[0,1]$ при помощи Min-Max масштабирования; при этом сохранён объект `scaler`, позволяющий после получения прогноза восстановить значения в физических единицах — градусах Цельсия и мегаваттах — и оценить RMSE в привычных метриках. Отсутствие пропусков и относительно небольшая размерность $N=7$ делают ETTh1 удобной «контрольной площадкой»: задача состоит в том, чтобы продемонстрировать, что даже при минимальном числе взаимосвязанных каналов внутренняя эволюционная адаптация и нечёткая фильтрация способны повысить качество прогноза, несмотря на отсутствие обширной сетевой диффузии сигналов.

Результаты прогнозов

На гистограмме ошибок прогнозирования температуры обмотки (рис. 1) основная масса плотности сосредоточена в пределах $\pm 0,05$ (нормализованных единиц), что указывает на хорошую калибровку модели и отсутствие выраженного смещения: медиана практически совпадает с нулём. Контуры распределения несколько вытянуты в положительную сторону, образуя лёгкую правостороннюю асимметрию. Этот эффект трактуется как систематическая склонность модели недооценивать температурные пики после периодов длительного охлаждения, обусловленная инерцией тепловой динамики трансформатора [3]. Невысокая, но заметная острота вершины отражает повышенную частоту малых ошибок и свидетельствует о том, что обученный ансамбль агентов успешно отрабатывает фоновое тепловое колебание, оставляя крупные промахи преимущественно в хвостах.

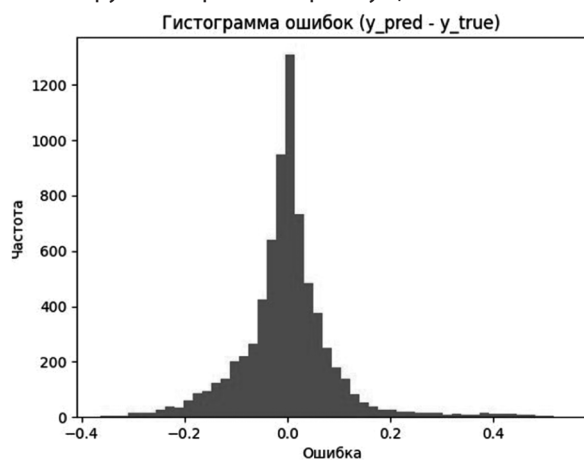


Рис. 1. Температура трансформаторов.
Диаграмма рассеяния



Рис. 2. Температура трансформаторов.
Диаграмма рассеяния

Диаграмма рассеяния «прогноз — факт» (рис. 2) демонстрирует линейную зависимость со склонностью к разрежённости по оси малых температур: при $y_{true} < 0,35$ распределение точек расширяется, а при $y_{true} > 0,6$ облако снова уплотняется вдоль биссектрисы. Такое поведение согласуется с физикой процесса: на участках низкой нагрузки теплоотдача трансформатора переходит в режим, где метеофакторы (скорость ветра, температура воздуха) начинают доминировать, и часть этих переменных неявно влияет через корреляционные связи, что приводит к большему разбросу прогноза [4]. Коэффициент детерминации, рассчитанный для представленного облака, равен $R^2=0,78$, что подтверждает, что модель улавливает как линейную компоненту зависимости, так и часть нелинейной кривизны. Небольшое количество точек, расположенных существенно ниже диагонали при $y_{true} \approx 0,25$, соответствует редким ночным провалам температуры, когда FELAR переоценивает эффект накопленного тепла. По аналогии с выводами [5] подобные промахи можно сокращать включением более длинного окна состояния или дополнительного погодного атрибута.

Заключение

Совместный анализ двух графиков показывает, что гибридная модель обладает низкой средней ошибкой и приемлемым разбросом даже в областях флуктуаций, но правосторонняя асимметрия и расширение облака при низких температурах сигнализируют о перспективах дальнейшей калибровки нечётких весов доверия к каналам нагрузки, а также возможной адаптации генетического цикла для учёта сезонной инерции масляного охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jardini J.A. et al. Power transformer temperature evaluation for overloading conditions //IEEE Transactions on Power Delivery. — 2005. — Т. 20. — №. 1. — С. 179–184.
2. Jun J., Kim H.K. Informer-based temperature prediction using observed and numerical weather prediction data //Sensors. — 2023. — Т. 23. — №. 16. — С. 7047.
3. Yang F. et al. A new method for transformer hot-spot temperature prediction based on dynamic mode decomposition //Case Studies in Thermal Engineering. — 2022. — Т. 37. — С. 102268.
4. Zhang C. et al. Understanding deep learning (still) requires rethinking generalization //Communications of the ACM. — 2021. — Т. 64. — №. 3. — С. 107–115.
5. Liu Y. et al. Global temperature sensing for an operating power transformer based on raman scattering //Sensors. — 2020. — Т. 20. — №. 17. — С. 4903.

© Черников Александр Владимирович (aleksandrchernikov98@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ ЭКСТРУЗИИ КАК УПРАВЛЯЮЩЕГО ПАРАМЕТРА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ

ASSESSMENT OF EXTRUSION TEMPERATURE AS A CONTROL PARAMETER FOR REDUCING VOLATILE ORGANIC COMPOUND EMISSIONS IN FUSION DEPOSITION MODELLING 3D PRINTING

Sharara Simbarashe

Summary. Fused deposition modelling 3D printing with common polymers like ABS and PLA releases volatile organic compounds, which raises notable environmental and health concerns. Adjusting extrusion temperature is a frequently attempted method for minimizing these emissions, but its actual effectiveness as a primary control strategy has not been thoroughly examined. In this study, sensitivity analysis, dynamic simulations, and hands-on experiments were conducted to evaluate temperature control's potential for reducing volatile organic compounds emissions. The results obtained show that temperature adjustments alone face some real limitations. Thermal inertia slows system responses, while inconsistent sensitivity across temperature ranges limits practical control. Even more, lowering the temperature too much can seriously undermine print quality. Ultimately, these findings suggest that simply relying on temperature adjustments is insufficient for effective emission reduction. Alternative approaches, like modifying extrusion speed or implementing active ventilation, should be considered for more sustainable emission management in fused deposition modelling printing.

Keywords: volatile organic compounds, three-dimensional printing, layer-by-layer deposition, Arrhenius equation, sensitivity analysis.

Шарара Симбараше

*Аспирант, Московский государственный
технологический университет «Станкин»
shackssharara@gmail.com*

Аннотация. Трёхмерная печать методом послойного наплавления с использованием обычных полимеров, таких как АБС и ПЛА, выделяет летучие органические соединения, что вызывает заметные проблемы для окружающей среды и здоровья. Регулировка температуры экструзии является часто используемым методом минимизации этих выбросов, но ее фактическая эффективность в качестве основной стратегии контроля не была тщательно изучена. В этом исследовании были проведены анализ чувствительности, динамическое моделирование и практические эксперименты для оценки потенциала контроля температуры для снижения выбросов летучих органических соединений. Полученные результаты показывают, что одни только регулировки температуры сталкиваются с некоторыми реальными ограничениями. Тепловая инерция замедляет реакцию системы, в то время как непостоянная чувствительность в диапазонах температур ограничивает практический контроль. Более того, слишком сильное снижение температуры может серьезно подорвать качество печати. В конечном счете эти результаты показывают, что просто полагаться на регулировки температуры недостаточно для эффективного сокращения выбросов. Альтернативные подходы, такие как изменение скорости экструзии или внедрение активной вентиляции, следует рассмотреть для более устойчивого управления выбросами при трёхмерной печати методом послойного наплавления.

Ключевые слова: летучие органические соединения, трёхмерная печать, послойное наплавление, Уравнение Аррениуса, анализ чувствительности.

Введение

Трёхмерная печать методом послойного наплавления (FDM) — это широко Трёхмерная печать методом послойного наплавления стала очень важной частью аддитивного производства, обеспечивая быстрое прототипирование и мелкосерийное производство в различных отраслях промышленности. Однако этот процесс печати выделяет летучие органические соединения, такие как стирол, формальдегид и этилбензол, особенно во время высокотемпературной экструзии термопластиков, таких как АБС и ПЛА [1]. Эти выбросы вносят огромный вклад в загрязнение воздуха

внутри помещений, создавая риски для здоровья, включая раздражение дыхательных путей и потенциальные канцерогенные эффекты [2]. Органы по регулированию окружающей среды часто подчеркивают необходимость решения проблемы выбросов летучих органических соединений от новых технологий для защиты профессиональной и бытовой среды [3]. Замена материалов, улучшенная вентиляция и оптимизация параметров процесса являются одними из некоторых из изученных стратегий. Регулирование температуры экструзии часто предлагается из-за ее прямого влияния на скорости термического разложения, как указано в уравнении Аррениуса [4]. Тем не менее, практическая эффективность

контроля температуры как реального времени или основного механизма минимизации летучих органических соединений остается плохо изученной. Предыдущие исследования количественно определяли выбросы летучих органических соединений при трёхмерной печати методом послойного наплавления [5], но лишь немногие критически оценивали температуру как управляющую переменную в динамическом реальном контексте. Чтобы устранить этот пробел в исследованиях, в этом исследовании используется мультифизический подход, объединяющий анализ чувствительности, динамическое моделирование и экспериментальную проверку для оценки ограничений температуры экструзии для смягчения летучих органических соединений.

Методология исследования

Поскольку термическое разложение материала считается химической реакцией. Уравнение Аррениуса может быть использовано для описания взаимосвязи между скоростью термического разложения и температурой

$$E_{voc}(T) = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (1)$$

где A — предэкспоненциальный коэффициент, E_a — энергия активации реакции разложения, R — универсальная газовая постоянная, T — абсолютная температура (K). $E_{voc}(T)$ — скорость выделения летучих органических соединений при температуре T (K).

Модель демонстрирует, что скорость выделения летучих органических соединений настолько чувствительна к температуре, что даже незначительные колебания могут существенно повлиять на выбросы летучих органических соединений. Эта выраженная чувствительность усложняет идею использования температуры экструзии в качестве переменной для контроля выбросов, поскольку поддержание выбросов ниже безопасных пороговых значений потребует поддержания очень узкого температурного диапазона. Это трудно сделать, не столкнувшись с проблемами с потоком материала или адгезией слоев. Для этого исследования параметры модели были выбраны для качественного отражения выбросов из нитей ABS, которые, как известно, выделяют такие соединения, как стирол, во время термического разложения.

Динамическое моделирование управления температурой

Тепловая динамика экструдера была аппроксимирована как линейная система первого порядка, инвариантная во времени (LTI), при условии ступенчатого изменения заданного значения температуры. Этот подход широко принят в инженерной литературе, поскольку он

эффективно фиксирует доминирующую тепловую инерцию и основную постоянную времени, регулирующую теплопередачу в таких системах. Соответствующая математическая модель выглядит следующим образом:

$$T(t) = T_{set} + (T_0 - T_{set})e^{-t/\tau} \quad (2)$$

$T(t)$ — температура экструдера в момент времени t , — новая целевая температура (K), T_0 — начальная температура до изменения (K), τ — постоянная времени, характеризующая скорость тепловой конвергенции

Это уравнение предполагает, что система имеет одну доминирующую теплоемкость и незначительные временные задержки, что является допустимым приближением для многих коммерческих экструдеров технологии послойного наплавления. Постоянная времени τ инкапсулирует комбинированные эффекты теплового сопротивления и теплоемкости системы. Затем динамический профиль $T(t)$ использовался в качестве входных данных для модели выбросов летучих органических соединений $E_{voc}(T)$ для оценки того, как выбросы развиваются в реальном времени после регулировки температуры.

Анализ чувствительности

Чтобы количественно оценить, как выделение летучих органических соединений реагируют на корректировки температуры экструзии, был проведен анализ чувствительности. В этом контексте чувствительность относится к частной производной скорости выделения по температуре, то есть она измеряет, насколько резко меняется скорость выброса даже при небольшом изменении температуры.

$$S(T) = \frac{dE_{voc}}{dT} \quad (3)$$

Эта производная выступает в качестве ключевого показателя для оценки как стабильности, так и управляемости выбросов при терморегулировании. Когда значения чувствительности высоки, даже незначительные изменения температуры могут вызвать значительные изменения выбросов, что усложняет точное управление выбросами только посредством температурного контроля.

$$S(T) = \frac{dE_{voc}}{dT} = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \cdot \left(-\frac{E_a}{RT^2}\right) \quad (4)$$

Результаты и обсуждение

Температура экструдера не достигает нового заданного значения мгновенно; вместо этого она приближается к целевому значению постепенно, демонстрируя экспоненциальное замедление. Это явление иллюстрирует концепцию тепловой инерции: экструдер не может

немедленно реагировать на изменения входного сигнала управления. В результате любая система управления на основе температуры будет изначально испытывать задержку, которая ограничивает как точность, так и скорость управления выбросами.

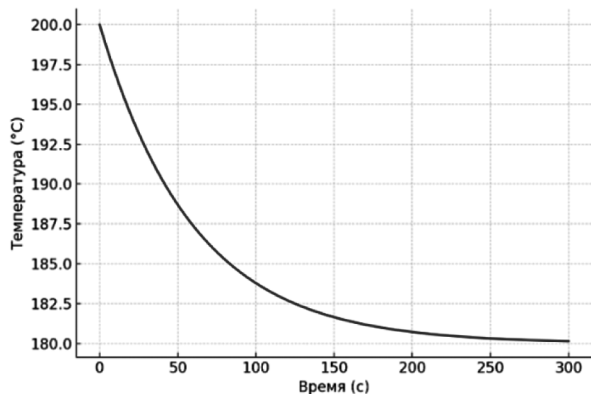


Рис. 1. Переходная характеристика температуры во времени

Несмотря на небольшое изменение температуры, выбросы летучих органических соединений резко уменьшаются. Это объясняется экспоненциальной чувствительностью скорости выброса к температуре. Даже небольшие изменения температуры вызывают большие изменения выбросов.

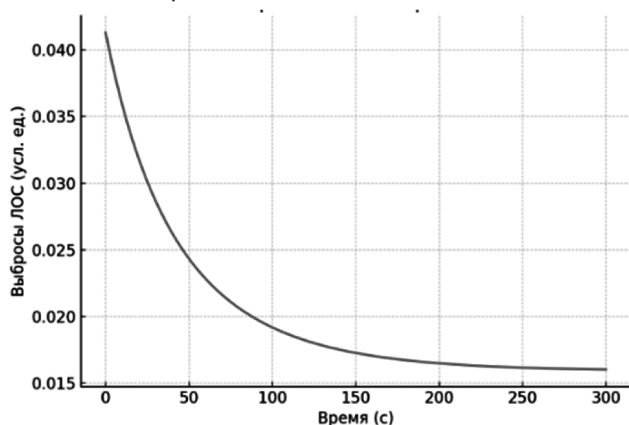


Рис. 2. Переходная характеристика выбросов летучих органических соединений

График выбросов летучих органических соединений и температуры (Рисунок 3) демонстрирует, что выбросы резко возрастают с ростом температуры. В диапазоне всего 10–15°C выбросы увеличиваются в несколько раз, что указывает на крайне нелинейную и нестабильную систему. Эта нестабильность представляет значительный риск: даже незначительные отклонения от обозначенной безопасной температуры могут легко привести к случайному превышению установленных пределов выбросов.

При понижении температуры чувствительность резко возрастает — особенно заметно в диапазоне 170–

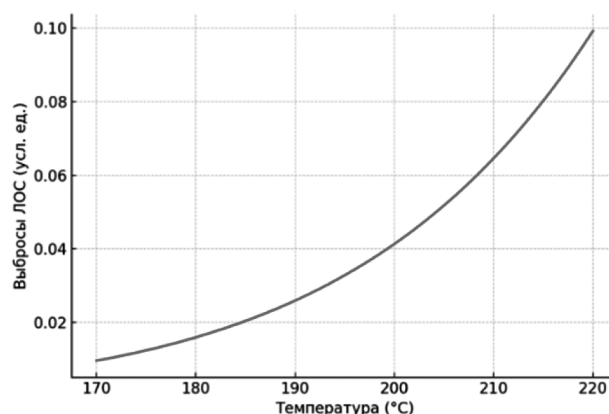


Рис. 3. Чувствительность скорости выделения летучих органических соединений к изменениям температуры

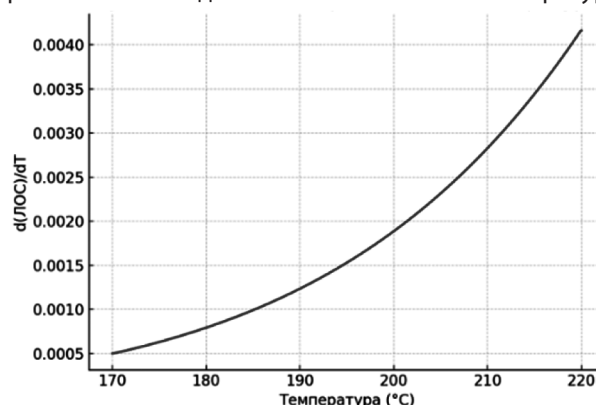


Рис. 4. Чувствительность выбросов летучих органических соединений к изменениям температуры (170–190°C)

190°C. Даже незначительное изменение всего на 1°C может вызвать значительный скачок выбросов. В этом диапазоне низких температур система становится крайне нестабильной, что делает точный и безопасный контроль практически невозможным.

Выводы

Результаты показывают, что скорость выброса летучих органических соединений имеет высокую экспоненциальную корреляцию с температурой экструзии. Однако, несмотря на очевидный эффект генерации выбросов из-за температуры, исследование показывает, что температура экструзии не является подходящей переменной для активного регулирования выбросов.

Температура экструзии также находится на переднем крае, чтобы служить двойной цели: она регулирует не только скорости термической деградации, но и физические и механические явления в процессе печати, такие как плавление нити, межслойная адгезия и стабильность потока. Меры, направленные на стабилизацию снижения температуры для смягчения выбросов летучих органических соединений, могут вызывать недоэкструзию, расслоение и механические дефекты напечатанной де-

тали. Таким образом, рабочее окно регулирования температуры по своей сути ограничено термопластичной природой материала.

Во-вторых, тепловая динамика регулировки температуры ограничена тепловой инерцией экструдера. Медленный тепловой отклик подразумевает, что любая схема реактивного управления, основанная на температуре как управляющей переменной, будет страдать от запаздывания и, таким образом, не будет подходить для противодействия кратковременным всплескам выбросов чрезвычайно короткой продолжительности. Таким образом, управление выбросами с обратной связью в реальном времени с использованием температуры экструзии по своей сути ограничено медленной тепловой динамикой системы.

Кроме того, исследование обнаруживает, что в идеальных условиях, таких как внезапные изменения заданного значения и идеальная реакция системы, максимальное подавление выбросов, достигаемое за счет падения температуры, ограничено, если находится в пределах безопасного диапазона рабочих температур нити. Например, для нити АБС снижение температуры

экструзии до уровня ниже 200 °C приведет к значительному снижению выбросов летучих органических соединений, но одновременно увеличит риск засорения сопла и плохой адгезии слоя. Эти результаты подчеркивают противоречивые требования между снижением выбросов и качеством печати, которые ограничивают применение температуры в качестве полезного и автономного входного сигнала управления.

В заключение, хотя очевидно, что температура экструзии является доминирующим регулятором скорости эмиссии летучих органических соединений во время трёхмерной печати, она не очень подходит для снижения эмиссии в динамических или работающих в реальном времени приложениях. Тесное взаимодействие между температурой и пригодностью к печати, экспоненциальный характер ее влияния на эмиссию и присущая латентность тепловых систем — все это делает температуру плохим кандидатом для управления эмиссией в замкнутом контуре. Эти ограничения означают, что управление температурой необходимо рассматривать как параметр времени проектирования, а не как динамически настраиваемую переменную при печати.

ЛИТЕРАТУРА

1. Выбросы ультрадисперсных частиц и летучих органических соединений (ЛОС) от коммерчески доступных 3D-принтеров / П. Азими, Д. Чжао, К. Пузе, Н.Э. Крейн, Б. Стивенс // *Environmental Science & Technology*. — 2016. — Т. 50, № 3. — С. 1260–1268.
2. Выбросы ультрадисперсных частиц настольными 3D-принтерами / Б. Стивенс, П. Азими, З. Эль Орч, Т. Рамос // *Atmospheric Environment*. — 2013. — Т. 79. — С. 334–339.
3. Потенциальные риски для здоровья человека и окружающей среды, связанные с технологиями 3D-печати / Агентство по охране окружающей среды США (EPA). — 2021. — URL: <https://www.epa.gov/sciencematters/potential-human-health-and-environmental-risks-associated-3d-printing> (дата обращения: 26.05.2025).
4. Безопасна ли 3D-печать? Анализ термической обработки термопластов: ABS, PLA, PET и нейлон / С. Войтыла, П. Клама, Т. Баран // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. — 2017. — Т. 14, № 6. — С. 80–85.
5. Характеристика химических загрязнителей, образующихся при работе настольного 3D-принтера, использующего ABS и поликарбонатные филаменты / А.Б. Стефаняк, Р.Ф. Лебуф, Т. Нюркевич, Д. Швейглер-Берри, Б.Т. Чен // *Journal of Chemical Health & Safety*. — 2019. — Т. 26, № 1. — С. 19–30.

© Шарара Симбараше (shacksshara@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ КОМАНДЫ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРСИЯМИ

COMPARATIVE ANALYSIS OF TEAM ORGANIZATION MODELS IN VERSION CONTROL SYSTEMS

M. Shakhov

Summary. This article is dedicated to a comparative analysis of team organization models in version control systems. The article focuses on the distributed Git system, but the models considered can be adapted to other systems, such as Mercurial or SVN. This topic is relevant because even today it is not exactly known which factors should influence the choice of a particular branching model, as well as how to properly adapt these models to the specific conditions of the team. The author reviews the advantages and disadvantages of the approaches, their structure and user experience. As a result of the study, recommendations for choosing and integrating the most effective model based on the specifics of the project, its infrastructure and the maturity level of the team are formulated. Additionally, attention was paid to the scalability of the models and their interchangeability due to similar development processes. The results of the study can be used to optimize development processes in agile teams and when implementing various DevOps practices. The article will be useful for both junior-developers and experienced specialists in development management.

Keywords: version control system, branching, development management, git, gitflow, trunk-based development.

Шахов Максим Андреевич

Аспирант, Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина
maxim.shkhv@yandex.ru

Аннотация. Данная статья посвящена сравнительному анализу моделей организации работы команды в системах управления версиями. Акцент сделан на распределенной системе Git, однако рассмотренные модели могут быть адаптированы и для других систем, таких как Mercurial или SVN. Актуальность данной темы обусловлена тем, что на сегодняшний день недостаточно изучен вопрос того, какие именно факторы должны влиять на выбор той или иной модели ветвления, а также как правильно адаптировать эти модели под конкретные условия работы команды. Автор проводит анализ достоинств и недостатков таких популярных подходов как GitFlow и Trunk-Based Development, их структуры и особенности эксплуатации. В результате исследования сформулированы рекомендации по выбору и внедрению в проект наиболее эффективной модели, основываясь на специфике проекта, имеющейся инфраструктуре, а также уровне зрелости команды. Помимо этого, уделено внимание вопросам масштабируемости моделей и их взаимозаменяемости за счет схожих процессов разработки. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации процессов разработки в agile-командах и при внедрении различных DevOps-практик. Статья будет полезна как для начинающих разработчиков, так и для опытных специалистов по управлению командной разработкой.

Ключевые слова: система управления версиями, ветвление, управление разработкой, git, gitflow, trunk-based development.

Введение

Современная разработка программного обеспечения требует эффективных подходов к управлению версиями и организации работы команд. В условиях высокой динамики изменений и необходимости обеспечения стабильности кодовой базы особую актуальность приобретает выбор оптимальной модели ветвления в системах контроля версий, таких как Git, Mercurial и SVN. На сегодняшний день в Git наибольшее распространение получили две методологии: GitFlow и Trunk-Based Development (TBD), каждая из которых предлагает различные стратегии управления ветками, интеграции изменений и выпуска релизов.

С практической точки зрения, необходимо сформулировать четкие рекомендации для менеджеров и разработчиков, которые помогут им выбрать наиболее подходящую модель ветвления еще на старте, а также поддерживать ее в актуальном состоянии в процессе работы над проектом.

Материалы и методы

Git, как и другие системы контроля версий предназначен для отслеживания изменений в коде проекта и координации работы членов команды. Однако, в отличие от своих аналогов, Git обеспечивает децентрализованное хранение репозитория, что позволяет участникам команды работать автономно, сохраняя полную историю изменений и возможность синхронизации с общим кодом. Ключевые функции Git включают фиксацию (commit) изменений, управление историей версий, слияние (merge) модификаций от разных разработчиков, а также откат к предыдущим состояниям проекта при необходимости. Использование Git в современных IT-проектах является стандартом де-факто, так как оно способствует повышению прозрачности разработки, минимизирует риски потери кода и в целом упрощает совместную разработку [1, с. 304].

Ветвление (branching) является одним из ключевых механизмов Git, позволяющим создавать параллельные,

изолированные линии разработки, называемые ветками. Это позволяет разработчикам работать над различными задачами одновременно, при этом не мешая друг другу. Помимо параллельного внесения изменений, данный механизм позволяет проводить тестирование, создавать релизы, а также находить и исправлять ошибки. Эффективное использование ветвления требует выбора оптимальной модели, которая будет соответствовать специфике проекта и команде разработчиков [8, с. 87].

Наиболее известными моделями организации работы команды являются GitFlow и Trunk-Based Development (TBD). GitFlow, предложенный Винсентом Дриссеном в 2010 году, представляет собой структурированный подход с жестким разделением веток для разработки, тестирования и выпуска.

В своей основе GitFlow предполагает наличие двух основных веток: master (или main) для стабильной версии кода и develop для активной разработки. Помимо этого, в проекте создаются вспомогательные ветки для исправлений ошибок (hotfix) и резизов (release). Основной же функционал проекта разрабатывается в ветках feature/*, которые создаются от develop и сливаются обратно в нее после завершения работы над функционалом [4, с. 3]. Таким образом, GitFlow позволяет команде работать над несколькими функциональными изменениями одновременно. При этом каждая feature-ветка является изолированной и перед слиянием ее код должен быть проверен, а само изменение протестировано как в автоматическом режиме, так и вручную. Такой подход позволяет назначать ответственного разработчика для каждой ветки, в то время как ревью ветки может быть проведено любым другим членом команды [5].

Однако, несмотря на популярность, GitFlow имеет два главных недостатка:

1. В модели никак не обговаривается то, какой объем задач можно выполнить в рамках одной ветки. Это может привести к тому, что разработчики будут создавать слишком большие ветки, которые другим членам команды будет сложно вовремя проверять и тестировать, поскольку у них тоже могут быть большие задачи в других ветках.
2. Из первого пункта вытекает то, что в проекте будут реже проводиться интеграции. Это может привести к тому, что в ветках будет появляться большое количество конфликтов, которые придется решать в момент слияния, что может еще больше забирать время у других членов команды.

Помимо GitFlow существуют его производные, такие как GitHub Flow и GitLab Flow. Эти модели предлагают более гибкие подходы к ветвлению и интеграции изменений, что позволяет командам адаптировать их под свои нужды. Например, GitHub Flow предполагает ис-

пользование только одной основной ветки (master или develop). При этом модель хорошо интегрируется с CI/CD-практиками, которые предоставляет сам GitHub, так как все feature-фетки сливаются через Pull Request, который позволяет проводить непрерывную интеграцию [9, с. 192]. Помимо этого, в отличие от GitFlow, в GitHub Flow после слияния ветки, изменения сразу попадают в продакшн.

Другой распространенной моделью, которую часто ставят в противовес GitFlow, является Trunk-Based Development (TBD). Эта модель предполагает, что разработка ведется в одной основной ветке trunk (название не имеет значения, поскольку она одна, поэтому иногда может называться master/main или develop), а все изменения интегрируются в нее как можно быстрее [10].

Основными особенностями TBD являются:

1. Короткоживущие feature-ветки (обычно не больше 1–2 дней), позволяющие разработчикам быстро интегрировать изменения в основную ветку;
2. Частые коммиты (несколько раз в день) в основную ветку. Вытекает из первого пункта;
3. Обязательная CI/CD-интеграция с автоматизированным тестированием каждого коммита. Без этого быстрая интеграция изменений в основную ветку могла бы провоцировать нестабильность кодовой базы;
4. Feature-флаги для управления незавершенным функционалом;

Короткоживущие feature-ветки и как следствие быстрые интеграции позволяют команде поддерживать актуальную версию кода и минимизировать количество конфликтов при слиянии. Для этого TBD также предполагает использование feature-флагов (сокр. FF), которые позволяют включать или отключать функционал по мере необходимости, что упрощает тестирование и развертывание новых функций. При помощи feature-флагов можно скрывать незавершенный функционал от продакшена, что позволяет разделять одну большую задачу на несколько маленьких, которые можно будет интегрировать в основную ветку по мере готовности. Именно такой подход дает возможность производить изменения в короткоживущих ветках [2, с. 170].

Очевидным плюсом короткоживущих веток является то, что их значительно легче проверять и тестировать. Из-за меньшего количества изменений в ветке ревью кода могут проводить все члены команды, а не только самые опытные разработчики. Это позволяет избежать ситуации, когда один разработчик становится узким местом в процессе разработки, так как он является единственным, кто может проверить и слить ветку в trunk. Такой подход также повышает вовлеченность всех членов команды в работу над кодовой базой и способствует

обмену знаниями между разработчиками. В этом плане TBD схож с методологией Extreme Programming (XP), которая также акцентирует внимание на совместной работе команды и частых интеграциях.

Для обеспечения темпа разработки в рамках короткоживущих веток, от команды требуется навык разбивки одной целостной задачи на несколько мелких. В рамках TBD такая техника называется *branch by abstraction* (англ. ветвление по абстракции). Ее суть заключается в том, что разработчик или команда создает абстракцию для нового функционала, а затем постепенно реализует его, не нарушая работу существующего кода [3]. В качестве примера можно рассмотреть задачу по замене старого модуля аутентификации *AuthAdapter* на новый. Данную задачу можно разбить на несколько этапов:

1. Создание интерфейса *AuthProvider* и его имплементация для нового и старого модуля;
2. Внедрение механизма выбора реализации (старой или новой) с помощью *feature*-флагов;
3. Через инструменты для A/B-тестирования часть трафика перенаправляется на новый модуль. У нового модуля анализируются потенциальные ошибки и скорость работы;
4. Если все прошло успешно, то старый модуль можно удалить, а новый оставить как основной.

Данный метод минимизирует риски, в особенности из-за того, что новый функционал можно легко отключить через *feature*-флаги, если что-то пойдет не так [7, с. 532]. Однако, у такого подхода в рамках TBD есть два основных недостатка:

1. Сложность организации задач по *branch by abstraction* менее опытными разработчиками. Для того, чтобы эффективно использовать данный метод, разработчики должны хорошо понимать архитектуру приложения и иметь высоко развитое абстрактное мышление.
2. Отсутствие четких рекомендаций по удалению *feature*-флагов. В процессе работы над проектом может накопиться большое количество *feature*-флагов, которые могут негативно сказаться на производительности приложения и усложнять кодовую базу. Это особенно актуально при разработке frontend-приложений, где отключенные при помощи флагов части кода все равно попадают в сборку проекта.

Результаты и обсуждения

Проводя сравнение двух основных моделей ветвления, можно сделать вывод о том, что для выбора оптимальной модели необходимо учитывать особенности команды, проекта и его архитектуры. В первую очередь следует ориентироваться на зрелость команды и ее координацию. Если команда состоит из опытных разработ-

чиков, которые ориентируются в архитектуре приложения, а *team lead* способен использовать абстракции для разбивки задач на подзадачи, то TBD будет оптимальным выбором. Это позволит команде поддерживать высокую скорость разработки и минимизировать количество конфликтов при слиянии. Однако, если команда состоит из новичков или разработчиков с низким уровнем координации, то использование TBD может привести к проблемам с интеграцией изменений и значительному увеличению времени на постановку задач.

Для команд с низкой координацией как правило больше подходит *GitFlow*, поскольку он описывает лишь сами правила ветвления и не затрагивает процессы постановки задач, а также разработки напрямую. *GitFlow* имеет более низкий порог вхождения, поскольку управлением ветками, интеграцией и ревью занимается *team lead* или более опытные *senior*-разработчики. Это позволяет новичкам сосредоточиться на написании кода, не отвлекаясь на организацию самих процессов разработки. Однако, стоит помнить и о том, что таким образом большая часть ответственности за качество кода ложится на плечи очень узкого круга разработчиков.

Другим критерием выбора модели является зрелость *DevOps* процессов в проекте (например, наличие качественного CI/CD). Если команда уже использует настроенную CI/CD инфраструктуру, то интеграция TBD в процесс разработки не составит труда, поскольку развитое автоматическое тестирование позволит с наименьшими усилиями проводить регулярные слияния.

При внедрении в проект TBD необходимо настроить поддержку *feature*-флагов, при помощи которых можно будет отключать незавершенные изменения и проводить A/B тестирование. Важно помнить, что *feature*-флаги не должны оставаться в кодовой базе на постоянной основе. Они должны храниться в коде только до тех пор, пока функционал не будет полностью завершен и протестирован. После этого флаги должны быть удалены. Стоит отметить, что модель TBD не описывает как именно должно проходить удаление устаревших флагов и решение этой задачи падает на плечи *team lead* или менеджмента проекта. Например, можно удалять ненужные флаги по завершению релиза, или раз в определенное время (например, раз в месяц). Первый вариант более предпочтителен для проектов, ориентированных на frontend, где при сборке проекта отключенные при помощи флагов части кода все равно попадают в финальную сборку (бандл) приложения, что может негативно сказаться на скорости загрузки и рендеринга страниц, а как следствие и на скоринге производительности (например, *Google Lighthouse*), который отвечает за SEO-продвижение.

Помимо решения вопроса о *feature*-флагах, необходимо провести инструктаж команды. Далеко не все даже

опытные разработчики хорошо знакомы с моделью TBS, поэтому следует разъяснить основные принципы работы в ее рамках. Важно донести команде, что основной задачей этой модели являются частые интеграции, из которых и вытекают все ее преимущества.

При выборе GitFlow в качестве модели ветвления необходимо в первую очередь настроить инфраструктуру в виде всех необходимых веток (master, develop, release, hotfix и т.д.). Время интеграции как правило не регламентируется, но стоит обозначить какие-то рамки, чтобы разработчики не создавали чрезмерно большие ветки.

Стоит помнить, что GitFlow также имеет ранее рассмотренные в статье производные (GitHub Flow и GitLab Flow). При этом GitHub Flow является наиболее простой разновидностью GitFlow, которая не требует не только специфичных навыков у членов команды, но и сложного контроля ветвления со стороны team lead. Это делает его оптимальным выбором для небольших команд, где управлением интеграциями занимается только один человек. При этом нужно отметить, что эта модель требует наличия CI/CD-инфраструктуры, которая будет обеспечивать более частые релизы чем в рамках обычного GitFlow. Таким образом, важной особенностью модели является то, что она наиболее похожа на TBD, поэтому ее возможно использовать в команде с недостаточным опытом, при этом не теряя возможность в будущем легко перейти на TBD.

Данное исследование оставляет открытым вопрос о том, как именно необходимо проводить инструктирование команды при внедрении TBD. Ответ на этот вопрос может потребовать дополнительных исследований и практических экспериментов в рамках реальных проектов. Стоит отметить, что подобные инструкции могут отличаться как в зависимости от уровня зрелости самой команды, так и от уровня профессионализма и роли конкретного разработчика.

Заключение

Модели организации ветвления в системах управления версиями представляют из себя мощный инструмент организации командной разработки. Только правильный подход в выборе модели ветвления позволит команде избежать проблем в будущем и извлекать максимум из своего потенциала. В данной статье были рассмотрены основные модели ветвления, их плюс и минусы, а также сформулированы четкие рекомендации по выбору наиболее подходящей модели в зависимости от уровня команды и инфраструктуры проекта. Важно помнить, что выбор модели ветвления не является перманентным и может меняться в будущем по мере развития продукта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фишерман Л.В. Git. Практическое руководство. Управление и контроль версий в разработке программного обеспечения // Наука и техника, 2022.
2. Capture the Feature Flag: Detecting Feature Flags in Open-Source / Meinicke J., Hoyos J., Hoyos V., Kastner C. // Proceedings of the 17th International Conference on Mining Software Repositories. 2020. pp. 169–173.
3. Fowler M. Branch by Abstraction [Электронный ресурс] // URL: <https://martinfowler.com/bliki/BranchByAbstraction.html> (дата обращения: 02.03.2025)
4. GitFlow: flow revision management for software-defined networks / Dwaraki A., Seetharaman S., Natarajan S., Wolf T. // In Proceedings of the 1st ACM SIGCOMM Symposium on Software Defined Networking Research. 2015. №6, pp. 1–6.
5. Gitflow workflow [Электронный ресурс] // Atlassian. URL: <https://www.atlassian.com/git/tutorials/comparing-workflows/gitflow-workflow> (дата обращения: 02.03.2025).
6. Humble J., & Farley D. Continuous Delivery. Addison-Wesley Professional, 2010.
7. Prutchi E., Heleno L. How the adoption of feature toggles correlates with branch merges and defects in open-source projects? // Software: Practice and Experience. 2021. № 52. pp. 506–536.
8. Shakikhanli U., Bilicki V. Optimizing branching strategies in mono and multi-repository environments: a comprehensive analysis // Computer Assisted Methods in Engineering and Science. 2024. № 31. pp. 81–111
9. The github development workflow automation ecosystems / Wessel M., Mens T., Decan A., Mazrae N., // In Software Ecosystems: Tooling and Analytics. 2023. pp. 183–214.
10. Trunk Based Development [Электронный ресурс] // URL: <https://trunkbaseddevelopment.com/> (дата обращения: 02.03.2025).

© Шахов Максим Андреевич (maxim.shkhv@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РЕШЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

SOLVING SOME PROBLEMS OF CHEMICAL KINETICS USING DIFFERENTIAL EQUATIONS

**A. Shemet
T. Ulengova**

Summary. This scientific article provides an in-depth analysis of the role of differential equations in the field of chemical kinetics and their importance in studying reaction processes and predicting their dynamics. Chemical kinetics is a key discipline that allows us to understand how chemical reactions occur and how the concentrations of reactants and products change over time. Differential equations serve as a powerful mathematical tool for describing and modeling these complex processes. The article extensively examines the fundamental types of differential equations applied in chemical kinetics. Special attention is given to rate equations, which describe the speed of chemical transformations, and equations describing the change in concentrations of reactants and products over time. These equations form the foundational basis for modeling reaction systems and enable in-depth exploration of their kinetic aspects.

An important aspect of the article is the discussion of various methods for solving differential equations used in chemical kinetics. The authors provide a detailed examination of numerical methods, analytical methods, and their combination. This allows chemists and researchers to develop more accurate mathematical models, predict the behavior of reaction systems, and even optimize conditions for conducting chemical reactions on an industrial scale.

The article also highlights the significance of using differential equations in scientific and engineering research. The mathematical approach provided by differential equations allows for a deeper understanding of reactions, the discovery of hidden patterns, and the creation of more precise forecasts in the field of chemical kinetics. This research opens up prospects for further studies in this area and underscores the value of mathematical modeling in the study of chemical reactions and processes. In conclusion, this article represents a significant contribution to the field of chemical kinetics and the modeling of chemical reactions. It emphasizes the inseparable connection between chemistry and mathematics and demonstrates how differential equations help us understand and predict complex chemical processes, which is of immense importance to the scientific and engineering communities. This article serves as a crucial starting point for anyone interested in chemical kinetics, providing a comprehensive understanding of the role of differential equations in this field and contributing to the advancement of knowledge and the development of more accurate and predictable models of reaction systems.

Keywords: differential equations, chemical kinetics, reaction processes, dynamics, rate equations, concentration, solution methods, mathematical approach.

Шемет Александра Менхаковна

Тихоокеанский государственный
университет, г. Хабаровск
202205267@togudv.ru

Уленгова Татьяна Георгиевна

старший преподаватель, Тихоокеанский
государственный университет, г. Хабаровск
000516@togudv.ru

Аннотация. Данная научная статья представляет глубокий анализ роли дифференциальных уравнений в области химической кинетики и их важности в исследовании реакционных процессов, а также в предсказании их динамики. Химическая кинетика является ключевой дисциплиной, которая позволяет нам понимать, как происходят химические реакции и как изменяются концентрации реагентов и продуктов со временем. Дифференциальные уравнения становятся мощным математическим инструментом для описания и моделирования этих сложных процессов.

В статье подробно анализируются основные виды дифференциальных уравнений, которые находят применение в химической кинетике. Особое внимание уделяется уравнениям скорости реакций, которые описывают, как быстро протекают химические превращения, и уравнениям изменения концентрации реагентов и продуктов со временем. Эти уравнения формируют фундаментальную основу для моделирования реакционных систем и позволяют углубленно исследовать их кинетические аспекты.

Важным аспектом статьи является обсуждение различных методов решения дифференциальных уравнений, используемых в химической кинетике. Авторы подробно рассматривают численные методы, аналитические методы и их сочетание. Это позволяет химикам и исследователям разрабатывать более точные математические модели, предсказывать поведение реакционных систем и даже оптимизировать условия проведения химических реакций в промышленных масштабах.

Статья также выделяет важность использования дифференциальных уравнений в научных и инженерных исследованиях. Математический подход, предоставляемый дифференциальными уравнениями, позволяет глубже понимать реакции, выявлять скрытые закономерности и создавать более точные прогнозы в области химической кинетики. Это исследование открывает перспективы для дальнейших исследований в этой области и подчеркивает ценность математического моделирования при изучении химических реакций и процессов.

Таким образом, данная статья представляет собой важный вклад в область химической кинетики и моделирования химических реакций. Она подчеркивает неотъемлемую связь между химией и математикой, а также демонстрирует, как дифференциальные уравнения помогают нам понимать и прогнозировать сложные химические процессы, что имеет огромное значение для научного и инженерного сообщества. Эта статья служит важным исходным пунктом для всех, кто интересуется химической кинетикой, и предоставляет обширное понимание роли дифференциальных уравнений в этой области, а также способствует продвижению знаний и разработке более точных и предсказуемых моделей реакционных систем.

Ключевые слова: дифференциальные уравнения, химическая кинетика, реакционные процессы, динамика, уравнения скорости реакций, концентрация, методы решения, математический подход.

Введение

Химическая кинетика, как важная дисциплина химической науки, посвящена изучению скорости химических реакций и механизмов, лежащих в их основе. Внимание к этой области возникает из желания не только описать и понять сами реакции, но и предсказать, как они будут протекать в различных условиях. Этот аспект химической кинетики становится особенно важным в контексте промышленных процессов, где оптимизация и контроль химических реакций могут иметь решающее значение.

Анализ и моделирование химических реакций являются сложными задачами, особенно при работе с системами, включающими большое количество реагентов и продуктов или при изменении параметров. В этом контексте математический инструментарий, включая дифференциальные уравнения, играет важную роль в описании и прогнозировании кинетических процессов.

Цель данной научной статьи заключается в исследовании важности математического анализа, основанного на дифференциальных уравнениях, в области химической кинетики. Мы рассмотрим различные виды дифференциальных уравнений, применяемых для описания химических реакций, а также методы их решения, используемые для моделирования кинетических процессов. Важной частью нашего исследования будет также рассмотрение практических примеров и приложений, которые покажут, как дифференциальные уравнения играют важную роль в изучении реакционных механизмов и в разработке новых химических технологий.

Исследование математического анализа дифференциальных уравнений в области химической кинетики имеет двойную значимость: оно не только углубляет наше понимание кинетических аспектов химических реакций, но также предоставляет путь к разработке более точных математических моделей. Эти модели, в свою очередь, способны прогнозировать и оптимизировать химические процессы в реальных условиях, что является важным шагом в совершенствовании химических технологий и промышленных процессов.

Основные результаты

В области химической кинетики существует несколько важных классов дифференциальных уравнений, которые играют ключевую роль в анализе и моделировании реакционных процессов. Один из наиболее распространенных типов уравнений — это уравнение скорости реакции.

Уравнения скорости реакций представляют собой дифференциальные уравнения, которые описывают,

как меняются концентрации реагентов со временем. В общем случае уравнение скорости может быть представлено в виде:

$$\frac{d[A]}{dt} = k[A]^m[B]^n$$

где $[A]$ и $[B]$ обозначают концентрации реагентов, k — константа скорости реакции, а m и n — степени реакции относительно реагентов. Это уравнение играет важную роль в определении зависимости скорости реакции от концентраций реагентов, что является ключевым шагом в анализе химических реакций.

Еще одним важным классом дифференциальных уравнений в химической кинетике являются уравнения изменения концентрации реагентов и продуктов со временем. Например, для реакции первого порядка, где реагент A превращается в продукт B , соответствующее уравнение может быть записано как:

$$\frac{d[A]}{dt} = -k[A]$$

где k — константа скорости реакции. Это уравнение описывает, как концентрация реагента A убывает со временем с постоянной скоростью, которая зависит от концентрации реагента и константы скорости. Решение таких уравнений позволяет нам понимать, как изменяются концентрации реагентов и продуктов во времени и какие закономерности присущи данной реакции.

Для решения дифференциальных уравнений в химической кинетике используются различные методы, в зависимости от сложности системы уравнений и возможности получения аналитических решений. Аналитические методы позволяют получать точные аналитические выражения для концентраций реагентов и продуктов и базируются на различных подходах, таких как метод разделения переменных, метод подстановки и использование интегрирующих множителей.

Однако аналитические методы могут иметь ограничения, особенно при работе с более сложными системами уравнений, где аналитические решения могут быть недоступны. В таких случаях применяются численные методы.

Решение дифференциальных уравнений в химической кинетике — важный этап в изучении реакционных процессов. Разнообразие реакций и сложные кинетические механизмы могут сделать анализ через аналитические методы невозможным, поэтому численные методы играют важную роль в этой области. Один из таких численных методов, метод Рунге-Кутты, применяется широко и оценивается за свою высокую точность и стабильность. Он позволяет ученым проводить подробное

моделирование кинетических процессов, а также рассматривать сложные системы реакций, для которых аналитические решения могут быть недоступны или практически неосуществимы.

Метод Рунге-Кутты является одним из наиболее распространенных численных методов для решения дифференциальных уравнений в химической кинетике. Этот метод основан на итеративном процессе и позволяет приближенно определить значения концентраций реагентов и продуктов в различные моменты времени. Метод Рунге-Кутты характеризуется высокой точностью и стабильностью, что делает его предпочтительным в численном анализе химических реакций. Он позволяет проводить детальное моделирование кинетических процессов, даже в случаях, когда аналитические решения недоступны или неэффективны.

Кроме метода Рунге-Кутты, существует простой метод Эйлера, который используется для решения дифференциальных уравнений первого порядка. Метод Эйлера основан на аппроксимации производной и позволяет вычислить значения концентраций на следующем временном шаге на основе текущих значений и скорости реакции. Этот метод предоставляет более грубую аппроксимацию по сравнению с методом Рунге-Кутты, но он является простым в реализации и может быть использован для быстрых численных расчетов.

Методы конечных разностей представляют собой класс численных методов, которые разбивают реакцию на конечные интервалы и аппроксимируют производные. Эти методы позволяют преобразовать дифференциальные уравнения в систему алгебраических уравнений, которую можно численно решить. Методы конечных разностей предоставляют хорошую точность и могут быть использованы для широкого спектра задач в химической кинетике.

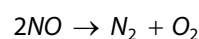
Применение дифференциальных уравнений в химической кинетике имеет ряд важных приложений. Дифференциальные уравнения позволяют определить кинетические параметры реакций, такие как константы скорости и степени реакции. Это позволяет исследовать влияние различных факторов, таких как температура, давление и наличие катализаторов, на скорость реакции.

Они также используются для создания математических моделей реакционных систем, что позволяет предсказывать поведение системы в различных условиях, оптимизировать процессы и предсказывать результаты реакций. Математические модели являются важным инструментом при проектировании и оптимизации химических реакторов.

Более того, дифференциальные уравнения помогают разрабатывать реакционные механизмы, которые описывают последовательность стадий реакции и переходы между реагентами и промежуточными продуктами. Исследование реакционных механизмов позволяет глубже понимать механизмы протекания реакций и предсказывать продукты реакции.

Давайте рассмотрим наглядный пример применения дифференциальных уравнений в химической кинетике на примере реакции разложения азотного оксида [NO].

Уравнение реакции:



Для выполнения численного решения данного дифференциального уравнения с использованием метода Рунге-Кутты мы прибегнем к классическому методу четвертого порядка (RK4).

Сначала мы определим начальные значения концентрации и константы скорости:

$$[NO]_0 = 0.1M$$

$$k = 0.05 \text{ c}^{-1}$$

Выберем шаг времени $\Delta t = 0.1 \text{ c}$ и определим интервал времени, на котором мы хотим решить уравнение, например, от 0 до 1 с.

Применяем метод Рунге-Кутты:

1. Установим начальные значения:

$$NO = 0.1M$$

$$t = 0 \text{ c}$$

2. Для каждого шага времени:

- Вычислим коэффициенты k_1, k_2, k_3, k_4 :

$$k_1 = -k[NO]^2$$

$$k_2 = -k\left([NO] + \frac{\Delta t}{2} \times k_1\right)^2$$

$$k_3 = -k\left([NO] + \frac{\Delta t}{2} \times k_2\right)^2$$

$$k_4 = -k([NO] + \Delta t \times k_3)^2$$

- Обновим концентрацию:

$$[NO] = [NO] + \frac{\Delta t}{6} \times (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

- Обновим время:

$$t = t + \Delta t$$

3. Повторим шаг 2 для заданного интервала времени.

Продолжим вычисления до достижения конечного значения времени.

Пример численного решения с использованием метода Рунге-Кутты будет выглядеть следующим образом:

Таблица 1.

Зависимость концентрации от времени

t, с	[NO], М
0.0	0,10000
0.1	0,09045
0.2	0,08199
0.3	0,07461
0.4	0,06819
0.5	0,06264
0.6	0,05787
0.7	0,05380
0.8	0,05035
0.9	0,04744
1.0	0,04501

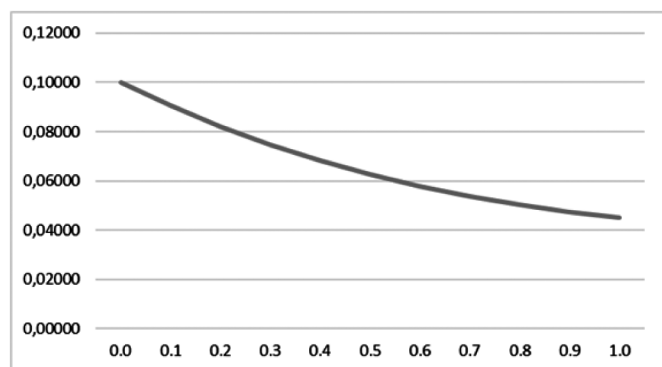


Рис. 1. Зависимость концентрации от времени

По результатам численного решения дифференциального уравнения методом Рунге-Кутты, можно сделать следующие выводы:

1. Концентрация NO убывает со временем, что соответствует реакции $2NO \rightarrow N_2 + O_2$. Исходная концентрация NO составляет 0.1 М, а после прохождения 1 секунды она уменьшается до 0.04501 М.
2. Уменьшение концентрации NO происходит плавно, поэтапно с каждым шагом времени. Это связано с использованием метода Рунге-Кутты, который обеспечивает более точное приближенное решение дифференциального уравнения по сравнению с методом Эйлера.

3. Значения концентрации NO на различных временных отрезках позволяют наблюдать изменение концентрации во времени. Например, на интервале от 0 до 0.1 секунды концентрация уменьшилась с 0.1 М до 0.09045 М.
4. Численное решение позволяет получить приближенные значения концентрации NO в разные моменты времени, что может быть полезно для анализа кинетических процессов в химических реакциях.
5. Обратите внимание, что полученные значения концентрации NO являются численным приближением и могут немного отличаться от точного аналитического решения. Однако метод Рунге-Кутты обеспечивает достаточно точное приближение, особенно при использовании достаточно малого шага времени.

Эти выводы подтверждают процесс убывания концентрации NO со временем, в соответствии с заданным дифференциальным уравнением, и подчеркивают эффективность численного метода Рунге-Кутты для решения дифференциальных уравнений в химической кинетике.

Заключение

В заключение нашего глубокого исследования мы усвоили важность дифференциальных уравнений и их фундаментальную роль в химической кинетике. Эти уравнения стали неотъемлемой частью инструментария для ученых и инженеров, которые стремятся понимать и моделировать сложные химические процессы. Мы заключаем нашу статью, подводя итоги наших находок и выделяя ключевые аспекты этой темы.

Фундаментальность дифференциальных уравнений: Дифференциальные уравнения играют фундаментальную роль в описании динамики химических реакций. Они предоставляют математическую основу для изучения изменений концентраций реагентов и продуктов во времени, а также позволяют ученым выявлять закономерности и зависимости, которые лежат в основе реакционных процессов.

Разнообразие дифференциальных уравнений: В нашей статье мы изучили различные виды дифференциальных уравнений, включая уравнения скорости реакций и уравнения изменения концентрации. Это разнообразие позволяет ученым выбрать подходящий инструмент для решения конкретной задачи и понимать разнообразие химических процессов.

Методы решения: Мы подробно рассмотрели различные методы решения дифференциальных уравнений, включая численные и аналитические подходы.

Это важно, так как выбор подходящего метода зависит от сложности системы уравнений и требуемой точности решения. Умение применять эти методы является ключевым навыком для химиков и исследователей.

Практическое применение: В нашей статье мы рассмотрели конкретные примеры применения дифференциальных уравнений в химической кинетике. Эти примеры демонстрируют, как математическое моделирование может быть использовано для оптимизации реакционных процессов, проектирования реакторов и предсказания результатов химических реакций. Это важно не только в научных исследованиях, но и в промышленности.

Значение математического анализа: Наше исследование подчеркивает важность математического анализа в химической кинетике. Математические модели, основанные на дифференциальных уравнениях, позволяют ученым и инженерам глубже понимать химические реакции, выявлять скрытые закономерности и создавать

более точные прогнозы. Этот анализ является ключевым для развития науки и промышленности.

В заключение необходимо подчеркнуть, что математический анализ дифференциальных уравнений в химической кинетике играет критически важную роль как в научных, так и в промышленных областях. Этот подход не только способствует глубокому пониманию природы химических реакций, но также является ключевым инструментом для разработки новых технологий и оптимизации производственных процессов. Для будущих исследований в области химической кинетики и моделирования реакционных процессов математический анализ дифференциальных уравнений остается незаменимым инструментом.

Таким образом, химическая кинетика продолжает оставаться захватывающей областью исследований, и математика является ее надежным спутником в путешествии к новым открытиям и глубокому пониманию сложных химических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов В.И. Курс высшей математики Том II / В.И. Смирнов. — Пред. Л.Д. Фаддеева, пред. И прим. Е.А. Грининой. — 24-е изд. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008. — 848 с.
2. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения. — М.: Издательство ЛКИ, 2014. — 422 с.
3. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. — М.: БИНОМ. Лаб. знаний, 2012. — 636с.
4. Леванов А.В., Антипенко Э.Е. Введение в химическую кинетику. — М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2006. — 51с.
5. Демченко В.В. Метод Рунге-Кутты решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка: Учебно-методическое пособие по курсу Вычислительная математика / Сост.: В.В. Демченко. — М.: МФТИ, 2004. — 20 с.
6. Мышенков В.И., Мышенков Е.В. Численные методы. Ч. 2. Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений: Учебное пособие для студентов специальности 073000. — М.: МГУЛ, 2005. — 109 с.: ил.
7. Романьков А.С., Роменский Е.И. Метод Рунге-Кутты/WENO для расчета уравнений волн малой амплитуды в насыщенной упругой пористой среде // Сиб. журн. вычисл. математики / РАН. Сиб. отд-ние. — Новосибирск, 2014. — Т. 17, № 3. — С. 259–271
8. Численные методы: в 2 ч. Ч. 2: [учеб. пособие] / В.Г. Пименов, А.Б. Ложников; [науч. ред. Ю.А. Меленцова]; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал, федер. ун-т. — Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 2014. — 106 с.
9. Крайнов А.Ю., Моисеева К.М. Численные методы решения краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений: учеб. пособие. — Томск: STT, 2016. — 44 с.
10. Ипатова В.М., Пыркова О.А., Седов В.Н. Дифференциальные уравнения. Методы решений: учеб. пособие / В.М. Ипатова, О.А. Пыркова, В.Н. Седов. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: МФТИ, 2012. — 140 с.
11. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. — Томск: Изд-во ТПУ, 2007. — 172 с.
12. Андреев В.Б. Лекции по методу конечных элементов: Учебное пособие. — М.: Издательский отдел факультета ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова (лицензия ИД N 05899 от 24.09.2001 г.); МАКС Пресс, 2010. — 2-е изд., испр. и доп. — 264 с.

© Шемет Александра Менхаковна (202205267@togudv.ru); Уленгова Татьяна Георгиевна (000516@togudv.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОЙ АРХИТЕКТУРЫ ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ НА ОСНОВЕ SLAM-АЛГОРИТМОВ И ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

DEVELOPMENT OF A HYBRID MAPPING ARCHITECTURE FOR GROUND VEHICLE AUTOPILOT SYSTEMS

P. Yaroschuk

Summary. This study focuses on the development and evaluation of a hybrid architecture for map construction in ground vehicle autopilot systems. By combining deep learning, mathematical optimization, and advanced localization algorithms, we synthesized an algorithm designed to estimate the 3D position of dynamic objects, map static environments, and simultaneously localize the ego-object (SLAM). The proposed method demonstrates improved computational speed compared to existing approaches while maintaining competitive accuracy. Unlike methods such as SMOKE, it generates richer scene-understanding data, enabling broader application without additional modifications. The algorithm is highly configurable and human-interpretable, allowing adjustable trade-offs between processing speed and mapping precision. It can be integrated as a component of autopilot systems ranging from simple robotic platforms (e.g., warehouse forklifts) to complex consumer vehicle autonomy (e.g., adaptive cruise control). The solution is self-contained, requiring only fine-tuning of a 2D detector to adapt to specific operational conditions.

Keywords: mathematical optimization, deep learning, slam method, dynamic programming, pnp problem.

Ярошук Павел Олегович

Аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский
Государственный Университет»
pay.pray.spray@gmail.com

Аннотация. Данное исследование направлено на разработку и оценку эффективности комбинированной архитектуры для построения карты в автопилоте наземного транспорта. Благодаря комбинации глубокого обучения, математической оптимизации и передовых алгоритмов локализации был синтезирован алгоритм, задача которого состоит в определении 3D положения подвижных объектов, картировании неподвижных и одновременной локализации положения объекта. Метод показал прирост быстродействия по сравнению с другими рассмотренными и сравнительно высокую точность, кроме того, в отличие от таких методов как SMOKE, он генерирует больше полезной информации о наполнении сцены, что позволяет использовать его для более широкого круга задач без дополнительной модификации. Метод обладает высокой степенью конфигурируемости и человеко-интерпретируемости, так что можно настраивать баланс между скоростью обработки/точностью построения карты. Данный алгоритм может быть применен как компонент автопилота как простых роботов, таких как складской погрузчик, так и более сложных систем автопилота и круиз-контроля потребительского транспорта. Он полностью самодостаточен и требует только дообучения 2D детектора для адаптации к требуемым условиям эксплуатации.

Ключевые слова: математическое моделирование, математическая оптимизация, динамическое программирование, алгоритм реального времени, глубокое обучение.

Введение

Развитие автономных систем вождения является ключевым направлением современной робототехники и транспортной индустрии. Для безопасного и эффективного функционирования автопилотов наземного транспорта критически важна способность системы точно определять собственное положение, строить детальную карту окружающей среды и взаимодействовать с динамически изменяющимися объектами. Существующие методы картирования и локализации часто сталкиваются с ограничениями, такими как недостаточная точность в сложных условиях, высокая вычислительная стоимость или ограниченный объем генерируемой информации о сцене.

Современные системы автономного вождения требуют высокоточных и надёжных карт, способных учитывать как статические, так и динамические элементы окружаю-

щей среды. Традиционные методы, основанные на лидарах, обеспечивают высокую точность, но связаны с высокими затратами и ограничениями в условиях плохой видимости. Визуальные методы, использующие камеры и алгоритмы компьютерного зрения, предлагают более экономичное решение, но сталкиваются с проблемами при изменении освещения и погодных условий.

Научная значимость работы заключается в синтезе комбинированной архитектуры, объединяющей глубокое обучение, настраиваемую математическую оптимизацию и передовые алгоритмы локализации. Предлагаемый метод демонстрирует прирост быстродействия и сравнительно высокую точность по сравнению с аналогами, а также генерирует больше полезной информации о сцене, что расширяет его применимость без дополнительной модификации. Высокая степень конфигурируемости и человеко-интерпретируемости метода позволяет гибко настраивать баланс между скоростью

обработки и точностью построения карты. Данный алгоритм является самодостаточным и может быть применен как компонент автопилота для различных типов наземного транспорта, от складских погрузчиков до потребительских автомобилей, требуя лишь дообучения 2D-детектора для адаптации к условиям эксплуатации.

Целью данного исследования является разработка и оценка эффективности комбинированной архитектуры для построения карты в автопилоте наземного транспорта, способной одновременно определять 3D-положение подвижных объектов, картировать неподвижные поверхности и выполнять одновременную локализацию положения транспортного средства.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследования:

- Синтезировать алгоритм, интегрирующий методы 2D-детекции и сегментации, ORB-SLAM для локализации и картирования неподвижных поверхностей, а также метод 3D-эстимации движущихся объектов.
- Оценить быстродействие и точность разработанного алгоритма в сравнении с существующими подходами.
- Продемонстрировать способность алгоритма генерировать обширную и полезную информацию о сцене для широкого спектра задач автопилотирования.
- Исследовать степень конфигурируемости метода и его человеко-интерпретируемость для настройки баланса между скоростью обработки и точностью построения карты.
- Проверку провести экспериментальную эффективность разработанной архитектуры на датасете KITTI.

Литературный обзор

Монокулярная 3D-детекция объектов в контексте автономного транспорта продолжает оставаться предметом активных исследований из-за её низкой стоимости и простоты интеграции, особенно по сравнению со стерео- и LiDAR-системами. Современные подходы к решению этой задачи, как правило, основываются на глубоком обучении и используют либо прямую регрессию параметров 3D-боксов, либо двухэтапные схемы с разделением задач детекции и оценки позы.

Одним из наиболее известных подходов является MonoDLE, предлагающий прямую регрессию параметров 3D-бокса и положения в пространстве на основе изображений [1]. Другой интересный метод, MonoFlex, объединяет многоуровневые признаки и использует гибкую систему потерь для улучшения точности предсказаний [2]. Тем не менее, большинство методов подоб-

ного типа страдают от высокой вычислительной нагрузки и требуют больших объемов обучающих данных.

Работы, направленные на повышение эффективности, включают FCOS3D [3], который базируется на безъякорном подходе и показывает высокую точность при разумной скорости обработки. Тем не менее, такие методы редко интегрируются в реальные SLAM-системы или учитывают геометрию сцены. В то же время, более геометрически ориентированные подходы, такие как MonoPair [4], используют отношения между объектами и их симметрией, но демонстрируют снижение производительности на плотных и неоднородных сценах.

Некоторые недавние исследования показывают, что использование PnP-подобных методов для оценки позы объекта на основе выделенных 2D-точек может повысить как интерпретируемость, так и устойчивость алгоритма к обобщению на новых сценах [5]. Это хорошо сочетается с идеей биологически вдохновленной обработки, где отдельные признаки объектов (например, передняя часть автомобиля) играют роль якорей для локализации.

Интеграция методов SLAM и 3D-детекции также активно развивается. Например, в работе [6] описано объединение ORB-SLAM с сетевыми методами, что позволяет одновременно проводить построение карты и отслеживание объектов. Однако их подход ориентирован на статичные сцены и не решает проблему ориентации движущихся объектов.

Таким образом, текущая работа отличается от существующих решений тем, что она:

- использует эффективную монокулярную 2D-детекцию (например, YOLO) с выделением характерных признаков;
- сочетает геометрический вывод с PnP-механикой для оценки глубины;
- включает SLAM-подсистему для оценки плоскости дороги и положения наблюдателя;
- направлена на реальное применение в условиях ограниченных ресурсов (вплоть до работы на мобильных GPU).

Такое комбинирование обеспечивает баланс между вычислительной эффективностью, точностью и универсальностью в разнообразных дорожных условиях.

Материалы и методы

Для построения метода за основу брались биологические принципы визуального восприятия информации, подробнее в работе [7]. Полученная архитектура системы включает две параллельные подсистемы: локализацию и картирование дороги с использованием ORB-

SLAM, а также оценку положения объектов. Последняя состоит из следующих этапов:

- 2D-детекция объектов и их характерных признаков,
- сопоставление признаков с априорными 3D-точками модели,
- построение 3D-луча через изображённую 2D-точку и определение положения объекта на плоскости дороги (из SLAM),
- оптимизация ориентации объекта по проекции 3D-модели (рис. 1).

Входные данные:

- Монокулярное RGB-изображение
- Калибровочная матрица камеры
- Набор априорных 3D-моделей объектов

Выходные данные:

- Спллайн дороги и доступная для движения зона
- 3D-координаты центра объектов в системе камеры
- Угол ориентации объектов (вдоль оси Y)

Локализация и построение карты статических объектов осуществляется алгоритмом SLAM, после чего происходит интерполяция полученных 3Д-точек. На основе полученных данных в дальнейшем осуществляется поиск глубины двумерного якоря.

Детекция

Особенностью метода является использование характерных 2D-признаков объектов для точной привязки к их 3D-модели. Признаки могут выделяться либо основной нейросетью, либо отдельной специализированной моделью. Сопоставление признаков позволяет выбрать 2D-якорь, соответствующий известной точке на канонической 3D-модели (точка сопоставляется по априорному правилу, заданному на этапе настройки для конкретного объекта). Пример детекции и сегментации на рис. 2 — обнаруживаются только автомобили (только для них составлялся датасет).

Поиск якоря

Для определения глубины строится 3D-луч, исходящий из камеры и проходящий через 2D-якорь. Точка пересечения луча с плоскостью дороги (определённой ORB-SLAM) используется как оценка положения объекта.

Оптимизация ориентации

Зная положение объекта и его 3D-модель, оптимизируется ориентация вокруг вертикальной оси. Это достигается путём минимизации функции ошибки между проекцией повернутой 3D-модели и наблюдаемой 2D-рамкой. Используется итерационный метод (напри-

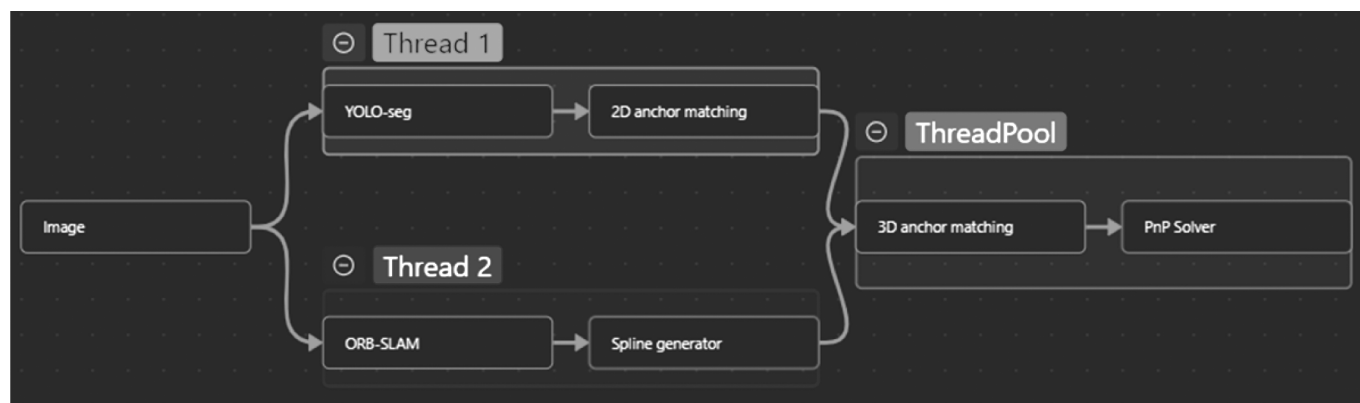


Рис. 1. Схема алгоритма

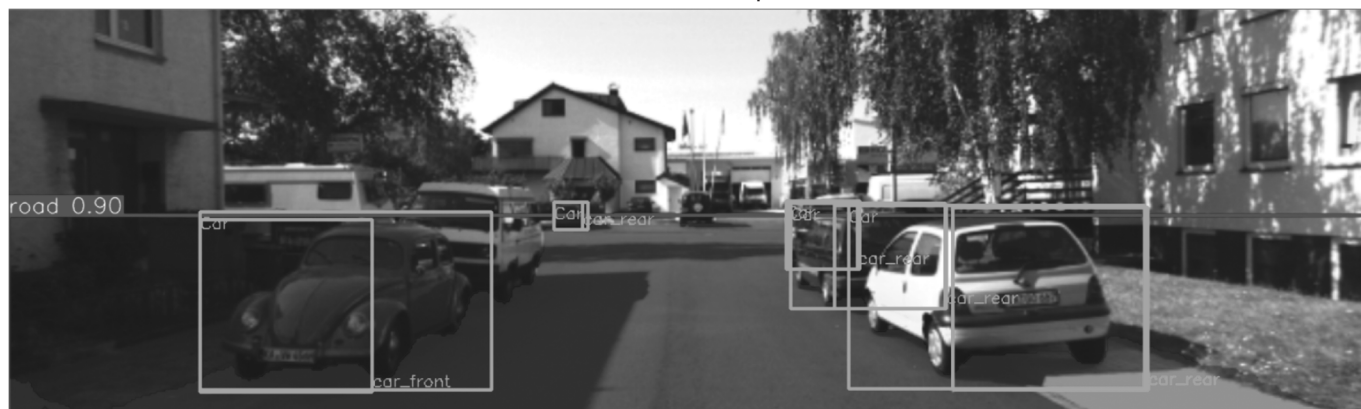


Рис. 2. Результат детекции и сегментации

мер, Гаусса-Ньютона), где на каждом шаге происходит численная оптимизация положения бокса на основе информации о боксе объекта.

Результаты

Для всесторонней оценки эффективности разработанного монокулярного алгоритма были проведены экспериментальные исследования на широко используемом в задачах автономного вождения наборе данных KITTI. В частности, использовалась подвыборка для 3D-детекции объектов, включающая синхронизированные данные с монокулярных камер и лидара, а также точную разметку трехмерных ограничивающих рамок. Основное внимание уделялось классу «автомобиль» как наиболее показательному для данной задачи.

Для количественной оценки производительности предложенной системы использовались стандартные метрики для задачи 3D-детекции объектов на датасете KITTI:

- Точность 3D-локализации (BEV IoU): Оценивается путем сравнения проекций 3D-боксов на горизонтальную плоскость (вид сверху), измеряя Intersection over Union (IoU) в Bird's Eye View.
- Точность оценки ориентации: Измеряется с помощью метрики Average Orientation Similarity (AOS) из протокола KITTI, которая учитывает как точность 2D-детекции, так и ошибку ориентации.

Помимо качества, оценивалась скорость обработки данных. Проводилось сравнение полученных показателей с другими монокулярными методами.

Оценка ошибки для трехмерной ориентации бокса по оси рыскания показала, что алгоритм достаточно точно отражает реальный поворот автомобиля. Сравнение с другими передовыми методами (Таблица 1) демонстрирует конкурентоспособные показатели точности ориентации.

Таблица 1.

Сравнение методов по точности 3D-ориентации

Метод	Easy AOS (%)	Moderate AOS (%)	Hard AOS (%)
Deep3DBox [8]	92.90	88.75	76.76
SMOKE [9]	92.94	87.02	77.12
Mono3D [10]	91.01	86.62	76.84
Твой метод	82.49	71.27	64.38

Для достижения высокой точности 3D-позиционирования, разработанный метод эффективно использует значения глубины в точках установки якоря, полученные из ORB-SLAM. Точность алгоритма выше или сравнима с передовыми методами, при этом стабильность

детекции выше. Значения Hard, Moderate, Easy схожи, при этом на средних случаях точность даже выше, чем на простых (Таблица 2).

Таблица 2.

Сравнение показателей точности совпадения теней 3D-боксов

Метод	Easy BEV AP (%)	Moderate BEV AP (%)	Hard BEV AP (%)
SMOKE	21.08	15.13	12.91
OPA-3D	17.05	24.60	14.25
DID-M3D	16.29	24.40	13.75
Твой метод	17.02	19.27	19.09

При этом, как видно из Таблицы 3, разработанный метод значительно превосходит аналоги по скорости обработки данных, достигая 25–33 FPS на мобильной видеокарте NVIDIA GTX 1650. Это преимущество в производительности делает его пригодным для интеграции в менее мощные и более энергоэффективные системы реального времени.

Таблица 3.

Сравнение производительности методов

Метод	Среднее FPS на GTX 1650
Mono3D	1 FPS
Deep3DBox	2–3 FPS
RTM3D	5 FPS
SMOKE	13 FPS
Ваш метод	20–25 FPS

На рис. 3 можно видеть пример работы алгоритма

Обсуждение

Метод не только демонстрирует хорошие показатели быстродействия, но и позволяет получать богатый набор данных для построения карты. Совмещение сегментации дороги с построением трехмерных точек позволяет алгоритму обрабатывать сложные ситуации, когда детекция объектов напрямую не срабатывает. Например, если на дороге лежит объект, не обнаруживаемый детекцией, он будет одновременно сегментирован YOLO-seg и локализован SLAM, поскольку будет выделяться на общем фоне. Это позволит, ко всему прочему, избежать ситуации, недавно произошедшей с автономным автомобилем Tesla, когда он проигнорировал сетчатое ограждение аэропорта и проехал насквозь. В случае с предложенным методом сетка создала бы много трехмерных опорных точек, которые можно было бы применить для построения карты.

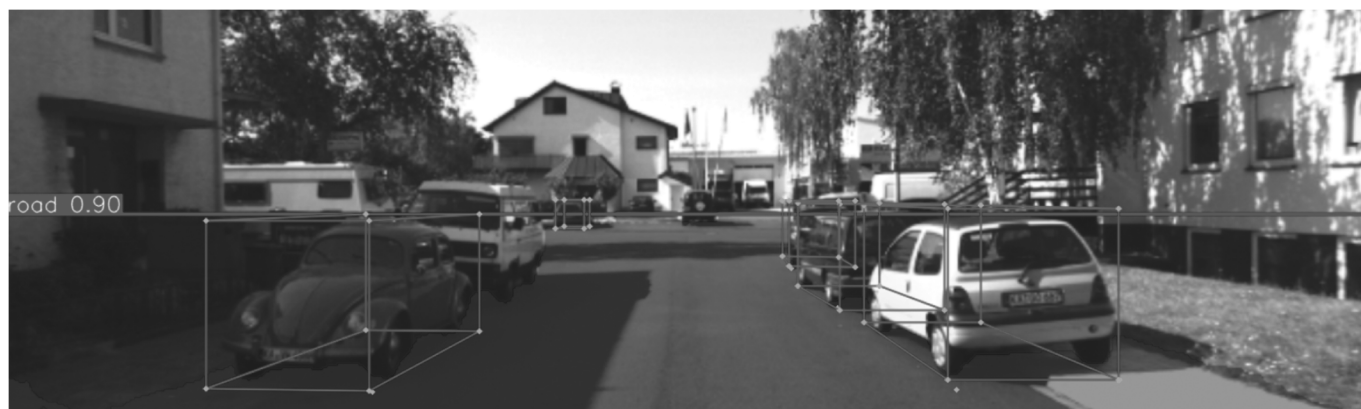


Рис. 3. Пример работы алгоритма

Метод позволяет получать «сырые» результаты до полного завершения работы, что может быть полезно в критических ситуациях, когда доли секунды определяют исход аварии и количество потенциальных жертв. Точность и скорость работы может быть дополнительно задана в настройках, а не только лишь зависит от весов и архитектуры обученной нейронной сети.

Кроме того, точность может быть улучшена путем дополнительной классификации автомобилей по габаритам, что позволит сопоставлять боксы более точно.

Заключение

В результате исследования был разработан высокопроизводительный алгоритм, пригодный для постро-

ения карты и локализации положения объекта в пространстве. Метод по производительности превосходит другие методы определения трехмерных объектов, кроме того, имеет преимущества в виде одновременной локализации и гибкого построения карты. Необходимо провести дальнейшие исследования по интеграции сегментации (например, для интеграции в карту ям и уточнения положения пешеходов по пробелам сегментации дороги) и улучшению производительности за счёт детекции большего количества видов габаритов автомобилей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ma X., Wang Z., Li H., Wang Y. MonoDLE: Monocular 3D Object Detection via Local Depth Estimation // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2021. С. 3126–3135.
2. Liu Z., Wang D., Shen Y., Wang Y., Lu H. MonoFlex: Multi-task Regression for Monocular 3D Object Detection // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2021. С. 9130–9140.
3. Wang Z., Wang Y., Zhan W., Tomizuka M. FCOS3D: Fully Convolutional One-Stage Monocular 3D Object Detection // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). 2021. С. 913–922.
4. Chen Z., Huang X. MonoPair: Monocular 3D Object Detection Using Pairwise Spatial Relationships // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2020. С. 12093–12102.
5. Simonelli A., Buló S.R., Porzi L., López-Antequera M., Kotschieder P. Disentangling Monocular 3D Object Detection // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). 2019. С. 1991–2000.
6. Sun J., Zhao Y., Zhang L., Yang M., Lin W. SLAM-aware Monocular 3D Object Detection for Dynamic Environments // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). 2022. № 35. С. 13760–13772.
7. Ярошук П.О. Метод анализа трехмерного положения объектов на двумерном изображении // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции. — Воронеж, 2024. — С. 812–817.
8. Mousavian A., Anguelov D., Flynn J., Kosecka J. Deep3DBox: 3D Bounding Box Estimation Using Deep Learning and Geometry // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017. С. 7074–7082.
9. Liu Z., Wang Y., Wu S., Su H., Zhu S., Bao H. SMOKE: Single-Stage Monocular 3D Object Detection via Keypoint Estimation // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). 2020.
10. Chen X., Kundu K., Zhu Y., Ma H., Fidler S., Urtasun R. Mono3D: Monocular 3D Object Detection for Autonomous Driving // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016. С. 2147–2156.

© Ярошук Павел Олегович (pay.pray.spray@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ A-PRF, L-PRF НА ЗАЖИВЛЕНИЕ И ПРОФИЛАКТИКУ ПОСТОПЕРАЦИОННЫХ ОСЛОЖНЕНИЙ ПОСЛЕ УДАЛЕНИЯ РЕТИНИРОВАННЫХ ТРЕТЬИХ МОЛЯРОВ

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE EFFECT OF A-PRF AND L-PRF ON HEALING AND PREVENTION OF POSTOPERATIVE COMPLICATIONS AFTER EXTRACTION OF IMPACTED THIRD MOLARS

K. Baratashvili

Summary. To improve patient quality of life and reduce complications following the extraction of impacted third molars, numerous medical and surgical techniques have been employed. Current evidence supports the clinical efficacy of A-PRF and L-PRF as materials to enhance the healing of both hard and soft tissues, while also minimizing postoperative complications such as pain, swelling, trismus, and alveolitis.

Keywords: PRF, A-PRF, L-PRF, impacted third molar, alveolitis, retention, trismus, growth factors.

Бараташвили Константин Георгиевич

Аспирант, Санкт-Петербургский

Государственный Университет

konstantin890@gmail.com

Аннотация. Для улучшения качества жизни пациентов и борьбы с осложнениями после удаления ретинированных третьих моляров используются многочисленные медицинские и/или хирургические методики. Имеющиеся данные свидетельствуют о клинической эффективности использования A-PRF и L-PRF в качестве материалов для улучшения заживления твердых, мягких тканей и снижения послеоперационных осложнений в виде боли, отека, тризма и альвеолита.

Ключевые слова: PRF, A-PRF, L-PRF, ретинированный третий моляр, альвеолит, ретенция, тризм, факторы роста.

Операция удаления зубов является наиболее частой процедурой выполняемая челюстно-лицевыми хирургами и стоматологами-хирургами.

Эта процедура может быть связана со значительными послеоперационными осложнениями, включая боль, тризм, отек, инфекцию места операции, а также альвеолярный остеоит (АО).

Боль — это неприятное сенсорное и эмоциональное переживание. Важно отметить, что она также является предупреждающим симптомом повреждения тканей и возникает во время заживления ран. Она может быть связана с фактическим или потенциальным повреждением тканей. Боль вызывается высвобождением медиаторов боли из поврежденных тканей, которые достигают своего пика в течение первого послеоперационного дня

Альвеолит — является одним из наиболее распространенных болезненных послеоперационных осложнений после хирургической экстракции третьих моляров, частота которого варьируется от 7 % до 32,6 %.

АО является многофакторным заболеванием. Однако все факторы в конечном итоге приводят к нарушению со-

зревания первоначально сформированного кровяного сгустка. Следовательно, какие бы методы ни использовались для профилактики или лечения АО, целью всегда является содействие нормальному заживлению. В попытке предотвратить АО были проведены обширные исследования различных материалов. Однако, до сих пор существуют большие разногласия относительно наиболее подходящего и эффективного метода. В последние годы фибриновые сгустки стали являться одним из путей решения проблем после операции удаления зуба.

Аутогенные материалы, приготовленные из крови пациента, всегда более перспективны, поскольку они содержат концентрат значительного количества факторов, необходимых для нормального заживления раны.

Основным ключом к процессу заживления является наличие адекватных факторов роста, которые содержатся в богатой тромбоцитами плазме (PRP) и богатом тромбоцитами фибрине (PRF) [12]. Клиническое применение PRF не приводит к иммунному отторжению, поскольку она получена из собственной венозной крови человека. Это препарат второго поколения, который действует как аутологичные факторы роста. Он может способство-

вать заживлению и связан с ранней организацией костного вещества. Он насыщен фибрином, тромбоцитами, лейкоцитами, факторами роста, цитокинами и другими компонентами. PRF имеет все элементы крови, которые выделяют ряд цитокинов, связанных с иммунной регуляцией, что делает его перспективным и полезным для заживления и уменьшения местной воспалительной реакции. PRF влияет на пролиферацию, дифференцировку и апоптоз клеток, связанных с восстановлением [1, 14]. PRF высвобождает факторы роста, такие как трансформирующий фактор роста-b1 (TGF-1), тромбоцитарный фактор роста (PDGF) и фактор роста эндотелия сосудов (VEGF), которые, как было доказано, способствуют заживлению ран и регенерации тканей [15, 16]; кроме того, он выделяет важный гликопротеин коагуляции (тромбоспондин-1).

Сообщается, что богатый тромбоцитами фибрин (PRF) уменьшает боль и воспаление, а также улучшает заживление твердых и мягких тканей после удаления зуба.

Богатый тромбоцитами фибрин (PRF) — это концентрат тромбоцитов второго поколения, адаптированный для упрощения приготовления без биохимической обработки крови. Это аутогенный растворимый биологический материал без посторонних примесей, который лучше всего подходит для хирургического вмешательства. PRF состоит из тромбоцитов, цитокинов, лейкоцитов и циркулирующих стволовых клеток, которые окружены гетерогенным фибриновым матриксом. Эти уникальные элементы в PRF делают его хорошим биоматериалом, обеспечивающим превосходное заживление. Медленное высвобождение цитокинов — сосудистого эндотелиального фактора роста, трансформирующего фактора роста, эпидермального фактора роста и тромбоцитарного фактора роста — являются ключевыми компонентами, играющими выдающуюся роль в неоваскуляризации и восстановлении тканей, что делает этот материал исключительно важным. В зависимости от скорости и времени центрифугирования можно получить различные подтипы PRF, а именно: лейкоцитарный PRF (L-PRF), стандартный PRF (S-PRF), усовершенствованный PRF (A-PRF), усовершенствованный PRF плюс (A-PRF +), i-PRF, T-PRF.

Современные методы лечения включают использование фибриновой пробки, которые имеют определенные бактериостатические свойства, или фибриновой мембраны в качестве наполнителя в экстракционных лунках для предотвращения осложнений и улучшения заживления альвеол (Choukroun, et al., 2006).

Насыщение раны фибрином позволяет увеличить синтез коллагена и кровоснабжение, что, в свою очередь, приводит к более быстрой регенерации тканей. Ускорение заживления снижает риск более поздних инфекций, осложнений и дискомфорта.

Имеющиеся данные свидетельствуют о клинической эффективности использования A-PRF и L-PRF в качестве материалов для улучшения заживления твердых, мягких тканей и снижения послеоперационных осложнений в виде боли, отека, тризма и альвеолита.

Классификация методов получения PRF

Первоначальный протокол получения PRF, представленный Choukroun и др. в 2001 году, требует сбора 10 мл образца крови без антикоагулянта в пластиковые пробирки со стеклянным покрытием, который сразу же подвергается центрифугированию при 2700 об/мин (около 400 g) в течение 12 мин. Полученную PRF обычно называют PRF Чукруна или лейкоцитарной PRF (L-PRF). Однако за последние несколько лет протокол PRF претерпел несколько модификаций. Эти протоколы привели к образованию различных продуктов с различной биологией и потенциальным применением.

Усовершенствованный PRF (A-PRF)

Поскольку хорошо известно, что высокая центробежная сила смещает клетки на дно пробирки, было предложено, что снижение скорости центрифугирования может предотвратить потерю клеток и увеличить количество лейкоцитов в матрице PRF. Усовершенствованная PRF (A-PRF) была получена при использовании пониженной центробежной силы 1500 об/мин (230 g) в течение 14 мин и стеклянных вакуумных пробирок. Производство A-PRF также может быть получено при использовании того же времени центрифугирования (14 мин), но со скоростью центрифугирования 1300 об/мин (200 g), как было предложено позже. Полученная A-PRF богаче по общему количеству жизнеспособных клеток по сравнению с L-PRF. Среди них наблюдается увеличение количества нейтрофилов, лимфоцитов и тромбоцитов.

Присутствие иммунных клеток влияет на дифференциацию и созревание макрофагов. Это может привести к регенерации костей и мягких тканей, в основном через факторы роста, выделяемых макрофагами. В соответствии с этими выводами, предыдущие отчеты документально подтвердили, что макрофаги отвечают за дифференцировку остеобластов, и образование костной ткани абсолютно ограничено без этих клеток. Кроме того, общее количество высвобождаемых факторов роста (TGF- β 1, VEGF, PDGF, EGF и IGF1) было заметно выше в A-PRF по сравнению с L-PRF. С другой стороны, другие авторы и исследователи в некоторых предыдущих исследованиях сообщали о снижении количества факторов роста, высвобождаемых из A-PRF, в отличие от L-PRF. Однако, несмотря на интенсивные исследования, имеются лишь ограниченные данные и необходимы дополнительные исследования для определения преимуществ и недостатков A-PRF и L-PRF.

A-PRF+

Дополнительная модификация протокола A-PRF привела к появлению новой формулы, названной Advanced— Platelets Rich Fibrin Plus (A-PRF+). Принимая во внимание, что сила центрифугирования напрямую влияет на количество клеток, захваченных в матрице PRF, исследователи попытались уменьшить время центрифугирования и, следовательно, снизить общее количество сил, которые могут привести к потере клеток.

Снизив скорость центрифугирования до 1300 об/мин (200 g) и времени центрифугирования до 8 мин, Fujioka-Kobayashi и др. представили протокол подготовки A-PRF+

Анализ полученных A-PRF+ выявил значительно повышенный уровень высвобожденных факторов роста (TGF- β 1 (трансформирующий фактор роста), VEGF (фактор роста эндотелия сосудов), PDGF (тромбоцитарный фактор роста), EGF (эпидермальный фактор роста) и IGF1 (инсулиноподобный фактор роста)) по сравнению с A-PRF и L-PRF. Кроме того, A-PRF+ способствовал усилению миграции и пролиферации клеток десны человека, в отличие от L-PRF. Наблюдаемое увеличение высвобождения фактора роста может быть связано с большим количеством лейкоцитов, попавших в фибриновую сетку из-за меньшей скорости и времени центрифугирования. Более того, воздействие A-PRF+ на культивируемые фибробласты десны привело к повышению уровня мРНК коллагена 1-типа через 3 и 7 дней культивирования.

Учитывая, что коллаген представляет собой один из важнейших факторов в процессе заживления и ремоделирования ран, полученные результаты указывают на регенеративный потенциал составов PRF, разработанных с уменьшенной скоростью центрифугирования скорости и времени.

Иммунологические свойства PRF, обусловленные его содержанием лейкоцитов, могут быть полезны для профилактики хирургической инфекции. В исследовании автора было обнаружено только два случая альвеолита (4 %), что согласуется с результатами других исследований.

Облегчение послеоперационной боли является важным критерием общего успеха удаления зуба. Кроме того, большинство потенциальных послеоперационных осложнений фактически проявляются в виде боли. В настоящем исследовании автора статьи степень боли измерялась с помощью VAS (Visual Analogue Scale «Визуальная аналоговая шкала») и количество таблеток анальгетиков, принятых для облегчения боли. Данное исследование показало, что применение PRF и анальгетиков значительно уменьшил послеоперационную боль после хирургического удаления удаленных третьих моляров.

Эти результаты показывают, что в группе A-PRF наблюдалась значительная разница в баллах боли в первый и второй день, количестве анальгетиков в первые 6 и 18 часов и заживлении мягких тканей на первой и второй неделе после удаления зуба по сравнению с другими группами.

В другой работе Alaa Z Makki, Anoud M Alsulami, Arwa S Almatrafi, Moroj Z Sindi, Shahinaz N Sembawa [17] было сравнение послеоперационных эффектов L-PRF и A-PRF на боль, общее количество принятых обезболивающих (анальгетиков) и заживление мягких тканей после операции удаления зуба.

В исследовании Alaa Z Makki, Anoud M Alsulami, Arwa S Almatrafi, Moroj Z Sindi, Shahinaz N Sembawa [17] оценивали боль после операции удаления зуба по визуальной аналоговой шкале (ВАШ). Показатели боли по шкале VAS в первый день были значительно выше в контрольной группе хирургической экстракции и группе нехирургической экстракции с L-PRF, в то время как в группе хирургической экстракции с A-PRF отмечалась слабая боль, а в группе нехирургической экстракции — отсутствие боли.

На второй день в контрольной группе было значительно больше баллов, чем в двух других группах ($P \leq 0,001$), в группе L-PRF отмечалась слабая боль в группе нехирургической экстракции, а в группе A-PRF — отсутствие боли в группе нехирургической экстракции.

Результаты по количеству анальгетиков, принимаемых пациентами

Пациентов спрашивали о количестве анальгетиков, принятых в первые (6, 12, 18, 24) часа после удаления зуба. В первые шесть часов количество анальгетиков, принятых пациентами, было значительно выше в контрольной группе хирургической экстракции.

В первые 12 часов не было существенной разницы между группами по количеству анальгетиков. Через 18 часов количество принятых анальгетиков было значительно выше в контрольной группе хирургической экстракции, в то время как через 24 часа существенной разницы между группами не было.

Saumaz и Uyanik, которые провели исследование по изучению и сравнению послеоперационных эффектов лейкоцитарно-богатого тромбоцитами фибрина (L-PRF) и улучшенного богатого тромбоцитами фибрина (A-PRF) с точки зрения боли, отека и тризма после операции на третьем моляре нижней челюсти, обнаружили, что послеоперационный балл боли и количество обезболивающих средств были значительно снижены в A-PRF по сравнению с L-PRF.

Результаты заживления мягких тканей в исследовании Alaa Z Makki, Anoud M Alsulami, Arwa S Almatrafi, Morojo Z Sindi, Shahinaz N Sembawa [17]. Индекс заживления ран Landry (LWHI) использовался через 1 и 2 недели после экстракции для оценки места экстракции на основании цвета тканей, реакции на прикосновение, маргинальности линии разреза и протяженности области. На первой неделе пациенты в группе A-PRF и группа L-PRF (нехирургическая экстракция) имели лучший индекс заживления по сравнению с контрольными группами.

Результаты исследования показывают, что в группе A-PRF наблюдалась значительная разница в баллах боли в первый и второй день, количестве анальгетиков в первые 6 и 18 часов и заживлении мягких тканей на первой и второй неделе после удаления зуба по сравнению с другими группами. Также показывают, что использование A-PRF значительно уменьшило послеоперационную боль и потребность пациентов в приеме анальгетиков и улучшило раннее заживление мягких тканей в группе A-PRF по сравнению с группой L-PRF.

Другие исследования, в которых сравнивались A-PRF и L-PRF в отношении высвобождения факторов роста, показали, что A-PRF высвобождает значительно большее количество факторов роста по сравнению с L-PRF. Многие исследования доказали, что концентрация тромбоцитов и лейкоцитов играет центральную роль в провоцировании процесса заживления и регенерации тканей путем высвобождения факторов роста и цитокинов.

Данное исследование показало, что использование простого, экономически эффективного A-PRF значительно уменьшило послеоперационную боль и потребность в анальгетиках, а также улучшило заживление мягких тканей в лунках удаленных зубов. Влияние этих биоматериалов на мягкие и твердые ткани должно быть дополнительно оценено в других клинических исследованиях в течение более длительного периода и на большей выборке.

Хоть тромбоциты и лейкоцитарные цитокины играют важную роль, но только фибрин, удерживающий и поддерживающий их, способен придать им терапевтический потенциал. Гармония между цитокинами и поддерживающей их фибриновой матрицей играет более важную роль, чем все остальные составляющие. Благодаря длительному (более 7 дней) выделению факторов роста A-PRF способствует быстрее регенерации костной ткани, десны и др. Исходя из работы В.В. Шамардина в период с 2014 по 2016 гг. наблюдались 62 пациента с различными патологическими процессами, в результате оперативного лечения которых образовались костные раны, а также те пациенты, которым проводились оперативные вмешательства по поводу рецессии десны. У 31 пациента в возрасте от 21 до 60 лет с диагнозом «ретенционная дистопия третьих моляров» было

выполнено удаление третьих моляров с последующим заполнением лунки сгустком A-PRF, назначением антибактериальной терапии и ушиванием раны. Заживление проходило в установленные сроки (до 6 суток) первичным натяжением, отмечалась положительная динамика: уменьшение отека мягких тканей, уменьшение тризма, снижение болевых ощущений по сравнению с традиционным ведением раны; — у 8 пациентов с рецессией десны, после центрифугирования и отжима, полученная A-PRF-мембрана (4 слоя) создала идеальный по размеру трансплантат, который был уложен на место рецессии в виде конверта и способствовал эпителизации, наступившей через 2 недели; — у 3 пациентов, в результате удаления 16 зуба, была вскрыта гайморова пазуха, после чего было принято решение применить методику A-PRF с последующим ушиванием раны. Спустя 2 недели наблюдали полное заживление раны и отсутствие сообщения с гайморовой пазухой; — у 20 пациентов после удаления зубов использовали только A-PRF для обеспечения быстрого заживления и образования костной ткани, как один из этапов предварительной подготовки для дальнейшей операции по имплантации. Уже через 3 месяца у них наблюдалось полноценное восстановление костной ткани.

Вывод

Проведённый анализ литературы и данные собственных клинических наблюдений демонстрируют высокую эффективность применения аутологичных фибриновых концентратов A-PRF и L-PRF при удалении ретинированных третьих моляров. Использование данных биоматериалов способствует:

- значительному снижению выраженности болевого синдрома в послеоперационном периоде,
- уменьшению частоты возникновения воспалительных осложнений, включая альвеолит,
- ускорению заживления мягких тканей, в том числе по индексу LWHI,
- снижению потребности в анальгетической терапии,
- улучшению общего качества заживления и уровня комфорта пациента.

Наиболее выраженный клинический эффект отмечен при использовании усовершенствованного фибрина (A-PRF), за счёт более высокого содержания факторов роста, нейтрофилов и лейкоцитов, а также медленного и пролонгированного их высвобождения. Эти особенности способствуют более эффективной регенерации тканей и профилактике осложнений.

Таким образом, включение PRF-технологий, особенно A-PRF и A-PRF+, в стандартный протокол удаления ретинированных третьих моляров может рассматриваться как обоснованная, безопасная и экономически эффективная мера для улучшения исходов хирургического вмешательства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Faez Saleh Al-Hamed, Mohamed Abdel-Monem Tawfik, Ehab Abdelfadil. Clinical effects of platelet-rich fibrin (PRF) following surgical extraction of lower third molar [Электронный ресурс] // [сайт]. [2021].
2. В.В. Шамардин Опыт применения А-PRF и I-PRF в повседневной практике врача-стоматолога на хирургическом амбулаторном приеме [Электронный ресурс] // [сайт]. [2017]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-primeneniya-a-prf-i-i-prf-v-povsednevnoy-praktike-vracha-stomatologa-na-hirurgicheskom-ambulatornom-prieme/viewer>
3. Pedro Christian Aravena¹, Ricardo Cartes-Velásquez, Cristian Rosas Signs and symptoms of postoperative complications in third molar surgery [Электронный ресурс] // [сайт]. [2017]. URL: http://www.jidmr.com/journal/DENTISTRY/2015/vol8_no3/8_D15_263_Pedro_Aravena.pdf
4. Susarla S.M., Blaesser B.F., Magalnick D. Third molar surgery and associated complications. [Электронный ресурс] // [сайт]. [2003]. Volume 15, Issue 2, May 2003, Pages 177–186.
5. David M. Dohan D.D.S., MS. Joseph Choukroun M.D., Antoine Diss D.D.S., MS., Steve L. Dohand, Anthony J.J. Dohane, Jaafar Mouhyi D.D.S., Ph. D. Bruno Gogly D.D.S., MS., Ph.D. Platelet-rich fibrin (PRF): A second-generation platelet concentrate. Part I: Technological concepts and evolution [Электронный ресурс] // [сайт]. [2006]. Volume 101, Issue 3, March 2006, Pages e37–e44. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S107921040500586X>
6. Voja Pavlovic, Milan Ciric, Vladimir Jovanovic, Milena Trandafilovic, Predrag Stojanovic, «Platelet-rich fibrin: Basics of biological actions and protocol modifications» [Электронный ресурс] // [сайт]. [2021]. URL: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/med-2021-0259/htmlv>
7. Barrier Membrane in Regenerative Therapy: A Narrative Review Muhammad Syafiq Alauddin 1,* , Nur Ayman Abdul Hayei 2 , Muhammad Annurudin Sabarudin 2 and Nor Haliza Mat Baharin [Электронный ресурс] // [сайт]. [2022]. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35629770/>
8. An Update on the Protocols and Biologic Actions of Platelet Rich Fibrin in Dentistry. [Электронный ресурс] // [сайт]. [2017]. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28590091/>
9. Comparison of the effect of advanced platelet-rich fibrin and leukocyte — and platelet-rich fibrin on outcomes after removal of impacted mandibular third molar: A randomized split-mouth study. [Электронный ресурс] // [сайт]. [2019]. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30975961/>
10. Potential for Osseous Regeneration of Platelet-Rich Fibrin-A Comparative Study in Mandibular Third Molar Impaction Sockets. [Электронный ресурс] // [сайт]. [2017]. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28249808/>
11. Use of Platelet-Rich Plasma and Platelet Rich Fibrin in Dentistry and Oral Surgery: Introduction and Review of the Literature. [Электронный ресурс] // [сайт]. [2019]. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31662059/>
12. Wu C., Lee S., Tsai C., Lu K., Zhao J., Chang Y. Platelet-rich fibrin increases cell attachment, proliferation, and collagen-related protein expression of human osteoblasts. Aust Dent J. 2012;57(2): 207–212. [Электронный ресурс] // [сайт]. [2012]. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22624763/>
13. Al-Hamed F., Tawfik M., Abdelfadil E., MAQ AS. Efficacy of platelet-rich firbin after mandibular third molar extraction: a systematic review and meta-analysis. J. Oral Maxillofac Surg. 2017; 75(6):1124–1135.
14. Canellas J., Ritto F., Medeiros M. Evaluation of postoperative complications after mandibular third molar surgery with the use of platelet-rich firbin: a systematic review and meta-analysis. Int J Oral Maxillofac Surg. 2017;46(9):1138–1146.
15. Novel Protocols for the Production of Autologous Blood Concentrates With High Platelet Volume. Renato Rossi Jr, Arun K Garg, Gregori M Kurtzman
16. The Growth Factors in Advanced Platelet-Rich Fibrin (A-PRF) Reduce Postoperative Complications after Mandibular Third Molar Odontectomy Anna Starzyńska 1, Magdalena Kaczoruk-Wieremczuk 1, Michele Antonio Lopez 2, Pier Carmine Passarelli 3, Paulina Adamska 1
17. The Effectiveness of Advanced Platelet-Rich Fibrin in comparison with Leukocyte-Platelet-Rich Fibrin on Outcome after Dentoalveolar Surgery Alaa Z. Makki, Anoud M. Alsulami, Arwa S. Almatrafi, Moroj Z. Sindi, Shahinaz N. Sembawa. [Электронный ресурс] // [сайт]. [2021]. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34046064/>

© Бараташвили Константин Георгиевич (konstantin890@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

КЛИМАТИЧЕСКИЙ ФАКТОР И ЗАБОЛЕВАЕМОСТЬ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ ПАТОЛОГИЕЙ

THE CLIMATIC FACTOR AND THE INCIDENCE OF CARDIOVASCULAR PATHOLOGY

E. Ivanova

Summary. Currently, the adverse effects of extreme weather events on cardiovascular activity, considering the differences in specific ecological niches, are of particular interest for studying the vulnerability of the circulatory system. The weather factors that contribute to the breakdown of the adaptive mechanisms of the circulatory system, the main manifestations of the exhaustion of these organs during short-term and continuous exposure to extreme climate are considered. Gaps in research devoted to the quantitative assessment of the impact of climate change on the state of the cardiovascular system are identified. It is noted that low and high temperatures are associated with the development of cardiovascular pathology and with an excess of hospitalizations and deaths from cardiovascular diseases (CHD, myocardial infarction, arterial hypertension). The adverse effect of severe climatic conditions on the cardiovascular system was established, which was expressed in the form of deterioration in well-being, and an increase in the frequency of exacerbations of CHD, especially in winter, in the high prevalence of metabolic syndrome. To develop an effective prevention strategy, an important task for public health is to consolidate with other departmental structures for a comprehensive assessment of the factors that influence the development of cardiovascular diseases under the influence of climatic parameters, especially in vulnerable communities.

Keywords: weather conditions, climate, cold, heat, extreme temperatures, cardiovascular system, cardiovascular pathology, arterial hypertension.

Иванова Елена Георгиевна

кандидат медицинских наук, доцент,
Приволжский исследовательский медицинский
университет, г. Нижний Новгород
Neon1080@mail.ru

Аннотация. В настоящее время неблагоприятное воздействие экстремальных погодных явлений на сердечно-сосудистую деятельность, с учетом различий конкретных экологических ниш представляют особый интерес для изучения уязвимости системы кровообращения. Рассмотрены погодные факторы, способствующие срыву адаптационных механизмов системы кровообращения, основные проявления истощения данных органов при кратковременном и непрерывном воздействии экстремального климата. Обозначены пробелы в исследованиях, посвящённых количественной оценке влияния изменения климатических явлений на состояние сердечно-сосудистой системы. Отмечено, что низкие и высокие температуры связаны развитием кардиоваскулярной патологии и с превышением числа госпитализаций и смертей от сердечно-сосудистых заболеваний (ИБС, инфаркт миокарда, артериальная гипертензия). Установлено неблагоприятное влияние суровых климатических условий на сердечно-сосудистую систему, которое выражалось в виде ухудшения самочувствия, и повышении частоты обострений ИБС, в особенности в зимний период; в высокой распространенности метаболического синдрома. Для разработки эффективной стратегии профилактики важной задачей общественного здравоохранения является консолидация с другими ведомственными структурами для всесторонней оценки факторов развития заболеваний сердечно-сосудистой системы под влиянием климатических параметров, особенно в уязвимых сообществах.

Ключевые слова: погодные условия, климат, холод, жара, экстремальные температуры, сердечно-сосудистая система, кардиоваскулярная патология, артериальная гипертензия.

Климатически обусловленным факторам риска ухудшения здоровья человека относятся непрерывное загрязнение воздуха, пребывание в условиях низких температур или экстремальной жары [7].

Пути и степень воздействия климата на здоровье значительно различается в зависимости от географического и социально-демографического контекста. Заболеваемость и смертность, связанные с погодными параметрами связаны с некоторыми характеристиками населения, включая пол, возраст, длительность пребывания в экстремальной среде, социально-экономическое положение и сопутствующие хронические заболевания, поскольку регион проживания и ограниченные экономические ресурсы определяют уязвимость к последствиям климатического влияния для здоровья [6].

Таким образом, в долгосрочной перспективе постоянное влияние суровых климатических явлений могут прямо или косвенно приводить к росту заболеваемости и смертности. При пребывании в условиях постоянного и временного воздействия абиотических условий, а также от изменения степени загрязненности воздуха больше всего страдают сердечно-сосудистая и дыхательная системы [13].

Оценка функции ущерба от смертности, связанной с температурой, на уровне стран с глобальным пространственным охватом и моделирование прогнозов для некоторых стран с низким и средним уровнем дохода показало, что глобальный уровень смертности, в конце столетия (2080–2099 гг.) увеличится на 4,2 % с учётом защитного эффекта от предполагаемого роста доходов [10].

Сообщается, что как высокие, так и низкие температуры в ближайшей перспективе приведут к значительной потере рабочей силы в больших городах и отдаленных регионах, поскольку экстремальные погодные условия приводят к серьезным ограничениям в трудовой деятельности человека [15].

В городских районах прогнозируется рост населения, что в дополнение к глобальному повышению абсолютной влажности приводит к тепловому истощению. Результаты модельных исследований показывают, что к 2050-м годам тепловой стресс в городах развитых стран может привести к увеличению потерь рабочей силы, превышающих 0,20 % от общего объема валового внутреннего продукта (ВВП) в год по сравнению с 2010-ми годами, от чего непропорционально сильно страдают низкооплачиваемые отрасли [5].

Экономический ущерб также актуален для холодных регионов, поскольку климатогеографические условия являются одним из основных факторов, побуждающих трудовых мигрантов покидать северные территории, после непродолжительного пребывания, а также могут быть причиной оттока представителей коренных народов и уроженцев 2–3 поколения. При этом, в качестве причин для переезда указываются как неблагоприятное влияние экстремального климата на здоровье, так и социально-экономические причины [5].

Исходя из этого, важной задачей общественного здравоохранения является глубокое понимание последствий воздействия климатических переменных для разработки стратегий по снижению их влияния на здоровье населения.

Цель исследования — провести анализ литературных данных, посвященных влиянию неоптимальных климатических условий на сердечно-сосудистую систему и представить резюме собственных исследований в данном направлении.

Согласно оценкам, как высокие, так и низкие температуры приводят к немедленному росту всех типов смертности и возрастных групп. Кардиоваскулярные нарушения, вызванные температурой, связаны прежде всего с повышенной симпатической реактивностью, за которой следует активация симпатической нервной системы, ренин-ангиотензиновой системы, спазм сосудов, угнетение противосвертывающей системы крови, нарушение тканевого дыхания и торможение метаболических процессов, обезвоживание, вызванный экстремальными температурами электролитный дисбаланс и системные воспалительные реакции [8].

На степень преобладания тех или иных компенсаторно-регуляторных реакций организма в ответ на воздей-

ствие низких температур влияет не только длительность пребывания в экстремальных условиях, существенное значение имеет возраста, гендерная принадлежность и другие факторы. К примеру, холодное воздействие усугубляет ранее существовавшие сердечно-сосудистые заболевания, значительно нарушает функцию и перфузию миокарда в более короткие сроки у людей с хроническими заболеваниями других органов и систем, чем у здоровых людей [19].

При тепловом стрессе для компенсации реакции организма на тепло наблюдается расширение сосудов, которая физиологически проявляется в виде повышенной нагрузки на сердце, гемоконцентрации и воспаления, или вегетативной дисфункции. Этим обусловлено повышение числа обращений в отделения неотложной помощи из-за сердечно-сосудистых заболеваний в период экстремальной жары [16].

Согласно анализу и соавторов, при повышении температуры на 1°C риск сердечно-сосудистой смертности увеличивается на 1°C [18]. Другие авторы утверждают, что аномальная жара провоцирует продемонстрировал увеличение смертности от сердечно-сосудистых событий 11,7 %–15 % во [12]. причём риск значительно выше для пожилых людей старше 65 лет [17]. Глобальный анализ данных за период с 1979 по 2019 год, проведенный в 27 странах, был направлен на изучение связи повышенного риска распространенных сердечно-сосудистых заболеваний (ишемической болезни сердца, инсульта и сердечной недостаточности) и воздействия экстремально высоких и низких температур. Авторы зафиксировали, что на каждые 1000 смертей от сердечно-сосудистых заболеваний 2,2 дополнительных смертей были связаны с экстремально высокими температурами; а избыточная смертность, связанная с экстремально низкими температурами, была стабильно выше, и составляла 9,1 [9].

Помимо этого, высокие температуры приводят к повышению уровня приземного озона, увеличению риска лесных пожаров и пыльных бурь, повышают спрос на электроэнергию и ископаемое топливо. Следующее за этим загрязнение воздуха, в частности, повышенный уровень мелкодисперсных частиц, пагубно влияет на здоровье сердечно-сосудистой системы [13].

Сообщается, что воздействие высоких температур на все типы смертности и возрастные группы является относительно краткосрочным, в то время как неблагоприятное воздействие низких температур длится дольше [8].

Отмечается, что для эффектов холода в течение 0–21 дня, снижение средней температуры на 1°C ниже порогов холода было связано с 3,65 % увеличением смертности от сердечно-сосудистых заболеваний и 21,57 % увеличением смертности от ИБС; в то время как повышение

средней температуры на 1°C выше порогов жары было связано увеличением смертности от ИБС на 17,00 % [22].

В другой работе, проведенной на территории США краткосрочный температурный эффект на органы ССС был выше в месяцы с более высокой температурной изменчивостью. Для кардиологических госпитализаций температурный эффект был выше в более холодные дни и в месяцы с более высокой температурной изменчивостью [8].

Аналогичная картина наблюдается и при других кратковременных погодных явлениях. К примеру, данные о смертности после ураганов свидетельствуют о росте заболеваемости и смертности от инфаркта миокарда. При изучении районов, сильно пострадавших от урагана и сравнении с региональными данными за последние 5 лет, предшествовавших урагану, было установлено увеличение заболеваемости инфарктом миокарда на 22 %, а увеличение смертности от инфаркта миокарда после 30 дней после урагана увеличилась на 31 % [20]. Согласно другим оценкам, сердечно-сосудистые заболевания являются основной причиной смерти при ураганах после утопления и травм и составляют 11 % от общего числа летальных исходов [11].

В отечественном научном пространстве повышенное внимание уделяется воздействию низких температур на организм человека, ввиду наличия обширных территорий с суровым климатом. Территория Крайнего Севера занимает обширную территорию, охватывая умеренный и холодный климатический пояс, с существенными различиями в климатических переменных (в сроках наступления и продолжительности сезонов года, колебаниях атмосферного давления, активности гелиокосмических факторов и показателях влажности, частых возмущениях ионосферы, в напряженности и изменчивости магнитного поля Земли, контрастностью светового дня на протяжении года). Длительный период суровой зимы с колебанием температуры воздуха в пределах минус 35–40 С; барометрические ямы, в виде резких сезонных, меж- и внутри суточных перепадов атмосферного давления; факторы электромагнитной природы, в виде сильных геомагнитных возмущений, и связанных с ними атмосферных явлений и высокая относительная влажность оказывают непрерывное влияние на организм жителей северных регионов [7].

Отечественные исследователи выявили высокие показатели артериальной гипертензии и ожирения по центральному типу у больных ИБС — жителей Крайнего Севера России [6].

В ходе нашего собственного исследования были зафиксированы высокая распространенность факторов развития сердечно-сосудистых катастроф — компонентом метаболического синдрома (абдоминальное ожи-

рение, атерогенная дислипидемия, повышение уровня глюкозы натощак и/или нарушение толерантности к глюкозе) у жителей Русского Севера с артериальной гипертензией. Чаще всего встречался 4-компонентный вариант метаболического синдрома и составлял около половины случаев, менее были распространены 3-компонентный и 5-компонентный варианты [4].

В ходе другого нашего исследования среднемесячного количества обострений сердечно-сосудистых заболеваний у пришлого населения ХМАО (проживание в условиях Крайнего Севера не менее 1 года) было обнаружено неблагоприятное влияние суровых климатических условий на сердечно-сосудистую систему, которое выражалось в виде ухудшения самочувствия, и повышении частоте обострений ИБС, в особенности в зимний период. Помимо этого, установлены гендерные различия — ухудшение состояния в связи с артериальной гипертензией чаще регистрировали у женщин всех возрастных групп, а обострение ранее подтвержденной ИБС чаще встречались у мужчин старше 40 лет, что вероятно связано с большей распространенностью предикторов риска (курение, ожирение, дислипидемия) у мужской части населения [1].

Помимо этого, нами была получена достоверная зависимость между степенью артериальной гипертензии и увеличением компонентов метаболического синдрома у обоих полов. У женщин были зарегистрированы особенности, связанные с гормональными изменениями, а именно снижение уровня ТГ наблюдалось в возрасте 48–58 лет, а также снижение уровня ХС ЛПВП по мере взросления [12].

Полученные результаты согласуются с мнением о том, что воздействие холода значительно ускоряет рост и нестабильность атеросклеротических бляшек. Холодовая акклиматизация активирует липолиз, что приводит к высоким уровням холестерина в крови и холестерина ЛПНП, особенно ЛПОНП и небольших остатков ЛПНП, которые являются основными липидами атеросклеротических бляшек. В экспериментах с использованием генетических моделей был показан значительный вклад снижения уровня адипонектина в плазме, вызванного холодом, в ускоренное развитие атеросклеротических бляшек [14]. Атеросклеротические бляшки при этом возникали в аортальных, коронарных, сонных и церебральных артериях были тесно связаны с высокой частотой сердечно-сосудистых заболеваний в экстремальных климатогеографических условиях [21].

На основе проведенного анализа были выделены основные предикторы метеочувствительности у жителей Крайнего Севера, страдающих артериальной гипертензией. В качестве независимых причин метеопатий у женщин были установлены СД 2 типа, наличие абдоминаль-

ного ожирения и уровень глюкозы в крови; у мужчин курение, одышка и содержание уровня натрия в крови. Положительная корреляционная зависимость описанного перечня и проявлений метеопатических реакций может быть связана с истощением адаптационных резервов организма в условиях длительного «северного стресса», что приводит к переходу углеводного на белковый тип обмена веществ и формированию метаболических осложнений. Однако, изучение повышенного содержания ионов натрия в качестве самостоятельного предиктора развития метеопатий требует дальнейшего подробного изучения [3].

Существование в условиях глобального загрязнения воздуха, изменения температуры в сторону экстремального снижения или повышения, и влияние этих событий на сердечно-сосудистую систему, оценка следующих за этим экономических потерь, остается одним из сложных для исследования направлений.

Взаимосвязи между температурой (в том числе, с ее краткосрочной изменчивостью) и госпитализацией из-за различных форм заболеваний сердца, существуют как на территориях с постоянной экстремальной средой, так и в регионах с умеренным климатом (рисунок 1) [8].

Всестороннее изучение механизмов патофизиологической реакции организма на воздействие температуры и развития сердечно-сосудистых заболеваний, междисциплинарные стратегии адаптации населения с учетом особенностей наиболее уязвимых сообществ, совершенствование трудового законодательства и модели теплового комфорта человека на рабочем месте, расширение на индивидуальном или общественном уровне просветительской работы по защитным методам от погодных явлений, представляются наиболее значимыми мерами для поддержания здоровья сердечно-со-

судистой системы в условиях экстремального влияния условий окружающей среды.

Следует отметить, что существуют значительные проблемы в исследованиях, посвященных количественной оценке влияния изменения климатических явлений на состояние сердечно-сосудистой системы. Учитывая сложный и многокомпонентный характер данного направления, для лучшего понимания общего бремени кардиоваскулярных нарушений и разработки экономически эффективных стратегий смягчения последствий или адаптации, может быть потенциально перспективным междисциплинарное сотрудничество между клиническими кардиологами, эпидемиологами, климатологами и другими специалистами. Хотя относительный риск заболеваемости и смертности в условиях экстремальных температур, существенно различается от исследования к исследованию, как низкие, так и высокие температуры связаны развитием кардиоваскулярной патологии и с превышением числа госпитализаций и смертей от сердечно-сосудистых заболеваний.

Поскольку экстремальные условия окружающей среды оказывают существенное влияние на сельскохозяйственное производство, продовольственную безопасность, доступ к электроэнергии и водоснабжению, а также на миграционные пути как людей, так и переносчиков болезней, важной задачей регионального здравоохранения является не только обеспечение медицинской помощи, но и консолидация с другими ведомственными структурами для всесторонней профилактики заболеваний сердечно-сосудистой системы, особенно в уязвимых сообществах.

Необходимо проведение расширенных исследований, для более точной количественной оценки и объяснения причин повышенной заболеваемости и смертности, связанные с климатическими явлениями.



Рис. 1. Климатические переменные и их влияние на состояние ССС

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванова Е.Г., Фомин И.В. Климатогеографические условия как фактор риска сердечно-сосудистых заболеваний у некоренных жителей Западной Сибири // Современные проблемы науки и образования. 2024. № 1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=33283> (дата обращения: 18.04. 2025).
2. Иванова Е.Г., Е.Д. Макарова, Е.С. Егорова, Е.А. Левушкина. Возрастно-половая характеристика метаболического синдрома у пришлых жителей Западной Сибири. В сборнике: От молекулы к системной организации физиологических функций. Материалы научно-практической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения член-корреспондента РАМН, профессора А.В. Завьялова. Курск, 2023. С. 107–112.
3. Иванова Е.Г., Потемина Т.Е. Предикторы метеочувствительности у пациентов с артериальной гипертензией в условиях крайнего севера // Вестник новых медицинских технологий. 2023. №30 (4). С. 6–11.
4. Иванова Е.Г., Фомин И.В. Артериальная гипертензия и метаболический синдром у некоренных жителей Крайнего Севера // Профилактическая медицина. 2022. №25(9). С. 46–52.
5. Лебедева-Несевря Н.А., Барг А.О., Чечкин В.М. Природно-климатические и антропогенные факторы риска для здоровья в субъективных оценках жителей городов Крайнего Севера // Здоровье населения и среда обитания. 2020. № 7 (328). С. 8–13.
6. Попова Е.К., Архипова Н.С., Попов И.О. Предикторы риска ишемической болезни сердца у мужчин старшей возрастной группы, проживающих в условиях Крайнего Севера // Экология человека. 2020. № 2. С. 4–11.
7. Черемисинов А.Н. Человек в условиях воздействия холода. Физическая культура в системе профессионального образования: идеи, технологии и перспективы: Сборник материалов IV всероссийской научно-практической конференции, Омск, 19 апреля 2019 года. — Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2019. С. 115–118.
8. Abrignani M.G., Lombardo A., Braschi A., Renda N., Abrignani V. Climatic influences on cardiovascular diseases // World J Cardiol. 2022. №14(3). P.152–169.
9. Alahmad B., Khraishah H., Royé D., et al. Associations Between Extreme Temperatures and Cardiovascular Cause-Specific Mortality: Results From 27 Countries // Circulation. 2023. №147(1). P.35–46.
10. Bressler R.D., Moore F.C., Rennert K., Anthoff D. Estimates of country level temperature-related mortality damage functions // Sci Rep. 2021. №11(1). P. 20282. doi: 10.1038/s41598-021-99156-5.
11. Brunkard J.N.G., Ratard R. Hurricane Katrina deaths, Louisiana, 2005 // Disaster Med Public Health Prep. 2008. №2. P. 215–223. doi: 10.1097/DMP.0b013e31818aaf55
12. Cheng J.Z., Bambrick H., et al. Cardiorespiratory effects of heatwaves: A systematic review and meta-analysis of global epidemiological evidence // Environ Res. 2019. №177. P.108610. 10.1016/j.envres.2019.108610
13. DeFlorio-Barker S.C.J., Reyes J., Rappold A.G. Cardiopulmonary effects of fine particulate matter exposure among older adults, during wildfire and non-wildfire periods, in the United States 2008–2010 // Environ Health Perspect. 2019. №127. P. 37006. doi: 10.1289/EHP3860
14. Dong M., Yang X., Lim S., et al. Cold exposure promotes atherosclerotic plaque growth and instability via UCP1-dependent lipolysis // Cell Metab. 2013/ №18(1). P.118–29. doi: 10.1016/j.cmet.2013.06.003.
15. He C., Zhang Y., Schneider A., et al. The inequality labor loss risk from future urban warming and adaptation strategies // Nat Commun. 2022. №13(1). P. 3847. doi: 10.1038/s41467-022-31145-2.
16. Li M.S.B., Zhang W., Vásquez E., Lin S. Impact of extremely hot days on emergency department visits for cardiovascular disease among older adults in New York state // Int J Environ Res Public Health. 2019. №16. P. 2119. doi: 10.3390/ijerph16122119
17. Liu J., Varghese B.M., Hansen A., et al. Heat exposure and cardiovascular health outcomes: a systematic review and meta-analysis // Lancet Planet Health. 2022. №6(6). P. e484–95. 10.1016/S2542-5196(22)00117-6
18. Moghadamnia M.T., Ardalan A., Mesdaghinia A., et al. Ambient temperature and cardiovascular mortality: a systematic review and meta-analysis // PeerJ. 2017. №5. P.e3574. 10.7717/peerj.3574
19. Sánchez-Gloria J.L., Roxana C., Mabel B.-Ch., et al. Cold exposure aggravates pulmonary arterial hypertension through increased miR-146a-5p, miR-155-5p and cytokines TNF- α , IL-1 β , and IL-6 // Life Sciences. 2021. № 287. P.120091
20. Swerdel J.N.J.T., Cosgrove N.M., Kostis J.B. Myocardial infarction data acquisition system (MIDAS 24) study group. The effect of hurricane sandy on cardiovascular events in New Jersey // J Am Heart Assoc. 2014. №3. P.e001354. doi: 10.1161/JAHA.114.001354
21. Xue Y., Petrovic N., Cao R., et al. Hypoxia-independent angiogenesis in adipose tissues during cold acclimation // Cell Metab. 2009. №9. P. 99–109. doi: 10.1016/j.cmet.2008.11.009.
22. Zhang Y., Li C., Feng R., Zhu Y., et al. The Short-Term Effect of Ambient Temperature on Mortality in Wuhan, China: A Time-Series Study Using a Distributed Lag Non-Linear Model // Int J Environ Res Public Health. 2016. №13 doi: 10.3390/ijerph13070722.

© Иванова Елена Георгиевна (Neon1080@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИЗМЕНЕНИЕ БИОРИТМОВ ЭЭГ У ПАЦИЕНТОВ С НЕЙРОПАТИЧЕСКИМ БОЛЕВЫМ СИНДРОМОМ В НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЯХ ПРИ ЭПИДУРАЛЬНОЙ НЕЙРОСТИМУЛЯЦИИ

ALTERATION OF EEG BIORHYTHMS IN PATIENTS WITH NEUROPATHIC PAIN SYNDROME IN THE LOWER EXTREMITIES DURING EPIDURAL NEUROSTIMULATION

**I. Kinash
A. Zhivotenko
T. Verkhovina
E. Ippolitova
E. Tsyslyak**

Summary. To assess the effectiveness of temporary epidural spinal cord neurostimulation in tonic and Burst modes, 47 patients (30–42 years old) with chronic pain resistant to therapy were examined using electroencephalography (EEG) before and after epidural spinal cord neurostimulation with rhythm analysis (alpha, beta, theta, delta) and vertex potential.

Results. Before treatment, EEG disorganization was detected: decreased alpha activity in the parieto-occipital area, increased theta and delta rhythms in the fronto-central lead, and the presence of vertex potential. Tonic stimulation reduced pain syndrome in 63 % of patients, partially normalizing the alpha rhythm, but maintaining theta activity. Burst mode (500 Hz, 40 Hz) was more effective: pain relief was registered in 95 % of patients, restoration of physiological rhythms (increase in alpha activity in the centro-parietal area, decrease in pathological theta and delta waves), disappearance of vertex potential was found in most patients.

The obtained data indicate that EEG disorganization and vertex potential serve as objective biomarkers of chronic neuropathic pain, and EEG monitoring confirms the effectiveness of epidural spinal cord neurostimulation, emphasizing more pronounced and stable analgesic effect of Burst stimulation.

The study emphasizes the role of EEG in objectifying the neuropathic pain treatment.

Keywords: neuropathic pain syndrome, electroencephalography, epidural stimulation.

Кинаш Ирина Николаевна

Кандидат биологических наук, Научный сотрудник,
НКО «Нейрохирургии», ФГБНУ «Иркутский научный
центр хирургии и травматологии»
kinash60@mail.ru

Животенко Александр Петрович

Научный сотрудник, НКО «Нейрохирургии»,
ФГБНУ «Иркутский научный центр хирургии
и травматологии»
sivotenko1976@mail.ru

Верховина Татьяна Константиновна

кандидат медицинских наук,
Иркутская государственная медицинская академия
последипломного образования — филиал ФГБОУ ДПО
«Российская медицинская академия непрерывного
профессионального образования»;
Врач-рефлексотерапевт, ФГБНУ «Иркутский научный
центр хирургии и травматологии»
tkverhovina@gmail.com

Ипполитова Елена Геннадьевна

Научный сотрудник, НКО «Нейрохирургии»,
ФГБНУ «Иркутский научный центр хирургии
и травматологии»
elenaippolitova@mail.ru

Цысляк Елена Сергеевна

Научный сотрудник, НКО «Нейрохирургии»,
ФГБНУ «Иркутский научный центр хирургии
и травматологии»
helenasergeevna@mail.ru

Аннотация. С целью оценки эффективности временной эпидуральной нейростимуляции спинного мозга (ЭНС) в тоническом и Burst-режимах обследовано 47 пациентов (30–42 лет) с хронической болью, резистентной к терапии с проведением ЭЭГ-мониторинга до и после ЭНС с анализом ритмов (альфа, бета, тета, дельта) и вертекс-потенциала.

В результате проведенных исследований: до лечения выявлена дезорганизация ЭЭГ: снижение альфа-активности в теменно-затылочных областях, повышение тета- и дельта-ритмов в лобно-центральных отведениях, наличие вертекс-потенциала. Тоническая стимуляция снизила болевой синдром у 63 % пациентов, частично нормализовав альфа-ритм, но сохранив тета-активность. Burst-режим (500 Гц, 40 Гц) оказался эффективнее: купирование боли у 95 % пациентов, восстановление физиологической организации ритмов (рост альфа-активности в центрально-теменных зонах, снижение патологических тета- и дельта-волн), исчезновение вертекс-потенциала у большинства.

Полученные данные свидетельствуют о том, что дезорганизация ЭЭГ и вертекс-потенциал служат объективными биомаркерами хронической нейропатической боли, а ЭЭГ-контроль подтверждает эффективность ЭНС, подчеркивая более выраженный и устойчивый анальгетический эффект Burst-стимуляции.

Исследование подчеркивает роль ЭЭГ в объективизации лечения нейропатической боли.

Ключевые слова: нейропатическая боль, эпидуральная стимуляция, электроэнцефалография, Burst-режим, вертекс-потенциал.

Введение

Нейропатический болевой синдром, развивающийся после хирургических вмешательств на поясничном отделе позвоночника (являясь многофакторным, входящим в структуру синдрома неудачно оперированного позвоночника FBSS и хронического послеоперационного болевого синдрома (МКБ 10 — M96.8 и МКБ 11 — MG30.5, MG30.21)), встречается в 25–36 % после хирургических вмешательств на поясничном уровне [1] и признан самым распространённым заболеванием периферической нервной системы, поражающим людей трудоспособного возраста [1,2]. Его главным симптомом являются интенсивные боли, которые доставляют человеку выраженный дискомфорт. Наличие хронического болевого синдрома у пациентов в большинстве случаев приводит к снижению работоспособности, появлению хронического эмоционального напряжения, вызывает стресс и устойчивое депрессивное состояние [1,3]. Следует отметить, что диагностика заболевания базируется в основном на субъективных данных: анамнезе заболевания, жалобах пациента, результатах неврологического осмотра с заполнением шкал-опросников при нейропатических болевых синдромах с оценкой его выраженности [4,5]. Для верификации диагноза и уточнения локализации и морфологического субстрата патологического процесса, приводящего к нейропатическому болевому синдрому, используют интроскопические и электрофизиологические методы исследования [6,7]. В литературе встречаются данные электроэнцефалографических исследований, в которых представлены изменения биоэлектрической активности мозга, «лимбической» системы» при различных патологических состояниях [8, 9, 10].

В настоящее время развивается направление эпидуральной стимуляции спинного мозга при нейропатических болевых синдромах (тонический и Burst режимы). Данный способ рассматривается как метод лечения хронического болевого синдрома, спастики, восстановления двигательного паттерна при Паркинсоне, нарушения функции тазовых органов [11, 12, 13]. Лечебное действие стимуляции до настоящего времени базируется только на субъективных данных и требует объективизации параметрами электроэнцефалографии. В связи с этим, представляется интересным провести анализ биоэлектрических процессов в коре мозга во время электро-стимуляции в тоническом и Burst режимах у пациентов с хроническим болевым синдромом при дорсопатии.

Целью исследования явилась оценка эффективности временной эпидуральной нейростимуляции спинного мозга (ЭНС) в тоническом и burst режимах с использованием электроэнцефалографии (ЭЭГ) как объективного метода диагностики и контроля лечения.

Материалы и методы исследования

В группу обследованных были включены 27 пациентов в возрасте 30–42 лет, из них мужчин — 11 и женщин — 16. Диагноз был поставлен на основании клинико-инструментального обследования пациентов с применением рентгенографии поясничного отдела позвоночника; компьютерной томографии (КТ); магнитно-резонансной томографии (МРТ), электронейромиографии (ЭНМГ). Все обследованные пациенты до оперативного вмешательства с установкой электродов предъявляли жалобы на постоянные боли в поясничной области, не связанные с физической нагрузкой, наличие признаков неврологического дефицита, расстройств чувствительности. Для оценки выраженности болевого синдрома использовали визуально-аналоговую шкалу (ВАШ), шкалу BNI (Barrow Neurological Institute) [14], согласно которой 40 пациентов имели боли, не контролируемые лекарствами (BNI IV), а 7 — сильные, неутрачиваемые боли (BNI V).

Для эпидуральной стимуляции применялись два вида стимуляции: в тоническом режиме, с подачей импульсов с определенной частотой и амплитудой и в режиме burst, с подачей импульсов определенными высокочастотными залпами.

При проведении ЭЭГ-исследований использовалась стандартная методика с использованием энцефалографа «Энцефалан-131-03» (НПКФ Медиком МТД г. Таганрог), где применялось расположение электродов по международной системе 10–20. Данная система основана на взаимосвязи между расположением электрода и областью коры головного мозга. Так, ЭЭГ электроды располагались в переднелобных (prefrontal) — Fp1, Fp2, лобных (frontal) — F3, F4, среднелобном — Fz, центральных (central) — C3, C4, центральном вертексном — Cz, теменных (parietal) — P3, P4, центральнотеменном — Pz, передневисочных — F7, F8, средневисочных (temporal) — T3, T4, задневисочных — T5, T6, затылочных (occipital) — O1, O2 и ушных областях — A1, A2. Анализ ЭЭГ произведен с помощью статистической программы IBM SPSS 21, включая корреляционный анализ по методу Спирмена для малой выборки. ЭЭГ проводилась до лечения и по окончании эпидуральной стимуляции в тоническом режиме и в режиме burst.

Материалы одобрены комитетом по биомедицинской этике ФГБНУ «Иркутский научный центр хирургии и травматологии».

Результаты и обсуждение

В дооперационном периоде у пациентов с болевым и мышечно-тоническим синдромом отмечались выраженные изменения показателей биоэлектрической ак-

тивности головного мозга. Регистрировалось снижение мощности волн альфа-диапазона в теменно-затылочных областях, одновременное повышение ее в лобно-центральных отведениях. Амплитуда волн бета-диапазона во всех отделах коры соответствовала значениям нормы. Во всех областях коры имело место наличие высокоамплитудных колебаний в тета-диапазоне, наибольшая мощность колебаний в лобно-центрально-теменных отведениях с амплитудным максимумом слева. Важно отметить, что амплитуда дельта- и тета-активности в лобно-центрально-височных областях коры имела сходные значения с альфа-активностью в этих же областях (таблица 1). В центрально-теменно-затылочных зонах, в зоне вертекса (макушки) у большинства обследованных регистрировался вертекс-потенциал в виде острого пика или медленной однофазной волны. Нестабильная форма ответа, по-видимому, зависит от повторяемости болевого раздражителя, и прежде, чем он приобретает форму пика, при дальнейшем действии болевого импульса проходит стадию медленной волны, растягивается во времени. Динамика изменения потенциала данного вида при боли предполагает, что он является неспецифическим ответом коры больших полушарий на раздражение.

Таблица 1.

Средняя мощность амплитуды и ее вариабельность (мкВ) в диапазонах ритмов ЭЭГ областей коры полушарий головного мозга у больных до операции

Область		Диапазон ритмов			
		Альфа	Бета	Дельта	Тета
Затылочная	правая	50,8±12,9	14,2±1,7	10,8±4,4	22,7±10,0
	левая	56,8±12,8	15,2±1,4	25,0±11,2	31,5±13,2
Теменная	правая	49,7±9,7	15,8±1,4	21,2±11,7	21,2±10,2
	левая	50,3±7,5	15,1±1,1	32,5±11,8	32,1±12,2
Центральная	правая	42,8±6,7	14,5±1,7	25,0±10,2	35,1±13,3
	левая	39,4±7,9	14,1±1,5	46,8±13,9	38,0±13,5
Лобная	правая	29,0±12,5	14,2±1,6	38,6±13,3	33,5±12,0
	левая	31,4±10,1	15,9±1,2	40,3±13,9	35,0±13,0
Височная	правая	31,5±9,7	15,5±1,7	42,0±13,4	32,5±12,2
	левая	29,7±10,2	15,6±1,4	38,8±13,3	32,8±13,3

Статистическая обработка значений мощности ЭЭГ у пациентов до операции по установлению электродов в позвоночнике выявила снижение мощности волн альфа-диапазона в теменно-затылочных областях, но в то же время повышение ее в лобно-центральных отведениях. Биопотенциалы бета-, дельта- и тета-активности регистрировались без четкой последовательности и без выделения доминирующего ритма. Регистрировался вертекс-потенциал. Все вышеперечисленное указывает

на наличие в группе обследованных дезорганизованного типа ЭЭГ.

Таблица 2.

Средняя мощность амплитуды и ее вариабельность (мкВ) в диапазонах ритмов ЭЭГ областей коры полушарий головного мозга у больных после стимуляции в тоническом режиме

Область		Диапазон ритмов			
		Альфа	Бета	Дельта	Тета
Затылочная	правая	45,8±12,9	16,2±1,5	10,8±4,4	10,7±3,2
	левая	47,8±12,6	16,2±1,3	10,0±3,8	10,5±3,2
Теменная	правая	45,7±9,7	16,8±1,5	11,2±4,7	10,2±0,9
	левая	49,3±7,4	16,1±1,1	12,5±4,8	10,5±0,9
Центральная	правая	32,8±6,7	17,5±3,7	15,0±3,9	15,0±3,2
	левая	30,4±7,7	17,1±2,5	16,8±4,3	18,0±3,5
Лобная	правая	нет	18,2±3,6	нет	13,5±3,5
	левая	нет	17,9±3,2	нет	15,0±3,0
Височная	правая	нет	17,5±2,7	нет	12,5±2,1
	левая	нет	17,6±2,4	нет	12,8±3,3

Примечание: * — $p < 0,05$

Анализ данных ритмов ЭЭГ у больных с электродами в режиме проведения тонической стимуляции (таблица 2) показал изменения биоэлектрической активности, наиболее выраженные в вертексной зоне. Наблюдалось умеренно выраженное снижение амплитуды альфа-активности в центрально-теменно-затылочных отведениях с сохранением зональных различий, абсолютные значения находились в границах физиологической нормы, в лобно-височных зонах альфа-ритм не регистрировался. Бета-активность регистрировалась во всех областях головного мозга, но в то же время усилилась по амплитуде в лобно-центрально-височных областях коры, дельта-активность регистрировалась в центрально-теменно-затылочных отведениях в пределах физиологической нормы. Изменилась форма вертекс-потенциала, снизилась его встречаемость. Подобная положительная динамика показателей ЭЭГ относительно дооперационных данных свидетельствует об эффективности проводимого лечения. В то же время усиление тета-активности, возможно обуславливает присутствие остаточных болевых ощущений в нижних конечностях.

При статистической обработке параметров ЭЭГ в режиме стимуляции burst (таблица 3) была отмечена положительная динамика показателей биоэлектрической активности, которая выражалась в увеличении мощности альфа-активности, локализованной в центрально-теменно-затылочных отведениях, хорошо мо-

дулированной с сохранением зональных различий. Бета-активность была выражена во всех отделах коры, но наиболее высокие показатели ее проявлялись в лобно-височно-центральных областях. Дельта- и тета-волны регистрировались в центрально-теменно-затылочных областях, их амплитуда соответствовала физиологической норме. Вертекс-потенциал сохранился у 2-х пациентов. В целом, отмечалось повышение организации ритмов, улучшение ЭЭГ до варианта нормы у 95 % пациентов.

Таблица 3.

Средняя мощность амплитуды и ее вариабельность (мкВ) в диапазонах ритмов ЭЭГ областей коры полушарий головного мозга у больных при стимуляции в режиме Burst

Область		Диапазон ритмов			
		Альфа	Бета	Дельта	Тета
Затылочная	правая	57,5±3,9	15,2±1,2	10,2±1,4	10,7±0,9
	левая	58,8±4,0	16,2±1,7	14,0±1,2	11,5±3,7
Теменная	правая	59,7±3,7	15,8±1,5	11,2±1,0	11,2±0,9
	левая	59,3±3,5	15,7±1,5	12,5±1,8	12,1±3,2
Центральная	правая	32,8±5,7	17,5±1,7	15,0±5,1	15,1±3,2
	левая	31,4±6,9	16,1±1,5	16,4±3,3	15,0±3,5
Лобная	правая	нет	16,5±1,6	нет	нет
	левая	нет	17,9±1,5	нет	нет
Височная	правая	нет	16,5±1,3	нет	нет
	левая	нет	16,9±1,2	нет	нет

Примечание: * — $p < 0,05$

Данный вид воздействия при подаче импульсов частотой 500 Гц и частотой подачи залпов 40 Гц имитирует физиологическую активность нервной системы и вызывает более выраженную реакцию коры головного мозга у пациентов, по сравнению с тонической стимуляцией, что приводит к снижению болевого синдрома. Режим действия залповой стимуляции состоит в том, что воздействие осуществляется как на латеральные, так и на медиальные восходящие пути болевых импульсов, отвечающие за их эмоциональную окраску. Стабильные межцентральные отношения в показателях ЭЭГ у пациентов с нейропатическим болевым синдромом при стимуляции в режиме burst, подтверждают наличие сбалансированности процессов в коре на уровне, наиболее адекватном для активности ЦНС. В итоге исчезновение болевых ощущений в конечностях в режиме стимуляции burst сопровождается положительной динамикой по-

казателей корковой ритмики, вызывая организованный тип ЭЭГ.

Обращает на себя внимание тот факт, что выраженные в дооперационном периоде нарушения ритмов в центрально-теменно-затылочной области — области вертекса — при тонической стимуляции нормализуются у 50 % пациентов, а при стимуляции в режиме burst в 90 % случаев имели положительную динамику. Таким образом, показатели ЭЭГ в проведенном исследовании являются объективным подтверждением изменения ВАШ показателя в случаях эпидуральной стимуляции.

Заключение

Изменения показателей ЭЭГ, известные как явления дезорганизации у пациентов при нейропатическом хроническом болевом синдроме (BNI — IV, V) позволяют отнести их к диагностическим маркерам боли. Применение электродной стимуляции разных режимов в группе обследованных пациентов явилось эффективным методом лечения болевого синдрома в поясничном отделе позвоночника и нижних конечностях, улучшая их общее эмоциональное состояние. При электростимуляции в тоническом режиме болевой синдром значительно уменьшился у 30 человек (63 %), у них ЭЭГ-контроль показал улучшение биоэлектрической активности коры головного мозга по сравнению с исходными данными. При стимуляции в режиме burst болевой синдром был практически купирован у всех обследованных, пациенты отмечали выраженный накопительный эффект с максимумом воздействия на 5–7 сутки стимуляции, при этом показатели ЭЭГ соответствовали физиологической норме, достоверно отличаясь от исходных данных.

Следовательно, ЭЭГ контроль является объективным подтверждением высокой эффективности лечения пациентов с нейропатическим болевым синдромом на поясничном отделе позвоночника при проведении эпидуральной стимуляции спинного мозга. Анализ ритмов ЭЭГ может предоставить объективные биомаркеры боли, дополняющие субъективные представления пациентов. Исследования в этой области должны развиваться и дальше, открывая новые перспективы и новые задачи для установления клинических взаимосвязей показателей ЭЭГ с эмоциональными и когнитивными компонентами боли.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бофанова Н.С., Масаева Р.Р., Вербицкая О.С., Колдова Т.Г., Ядренцева У.В. Хроническая боль в Международной классификации болезней 11-го пересмотра. // Российский журнал боли, 2021, т.19, №1, с.36–39.
2. Кичерова О.А., Климов Г.Ю., Рейхерт Л.И., Скрябин Е.Г. Особенности болевого синдрома при вертеброгенной патологии у женщин. // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2024;124(5):14–21. <https://doi.org/10.17116/jnevro202412405114>
3. Sloty P., Schu S. Burst SCS Microdosing Is as Standard Burst SCS in Treating Chronic Back and Leg Pain: Results from a Randomized Controlled Trial Jan Vesper, MD, PhD1. Neuromodulation: Technology at the Neural Interface. Accepted: September 27, 2018
4. Панасевич Е.А., Трифонов М.И. Прогнозирование успешной когнитивной деятельности на основе интегральных характеристик ЭЭГ// Физиология человека, «Наука», №2, 2018, Том 44, с. 103–111. doi: <https://doi.org/10.7868/S0131164618020145>
5. Дж. Бисмут, Ф. Виалатт, Ж.-П. Лефосе. Облегчение периферической нейропатической боли за счёт увеличения соотношения мощности низко- и высокочастотных колебаний в центральной области коры головного мозга с помощью нейробиоуправления на основе ЭЭГ: протокол исследования для контролируемого пилотного испытания (исследование SMRPain). Neurophysiol. Clin. Clin. Neurophysiol., 50 (2020), стр. 5–20, 10.1016/j.neucli.2019.12.002 Cancelli et al., 2016
6. Кинаш И.Н., Верхозина Т.К., Ипполитова Е.Г., Цысляк Е.С. Изменения биоритмов головного мозга при функциональных пробах у пациентов со стенозом позвоночного канала шейного отдела. Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Естественные и технические науки. №6, 2024, с.176–180
7. Joosten E.A., Franken G. Spinal cord stimulation in chronic neuropathic pain: mechanisms of action, new locations, new paradigms. Pain. 2020 Sep;161 Suppl 1(1): S104–S113. doi: 10.1097/j.pain.0000000000001854. PMID: 33090743; PMCID: PMC7434213.
8. Парфенов В.А., Яхно Н.Н., Кукушкин М.Л. и др. Острая неспецифическая (скелетно-мышечная) поясничная боль. Рекомендации Российского общества по изучению боли (РОИБ). Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика. 2018; 10(2); с.4–11.
9. P. Julkunen, V.K. Kimiskidis, P. Belardinelli Bridging the gap: TMS-EEG from lab to clinic J. Neurosci. Methods, 369 (2022), Article 109482, 10.1016/j.jneumeth.2022.109482
10. Furman T.J., Meeker J.C., Rietschel S., Yoo J., Muthulingam M., Prokhorenko M.L., Kease R.N., Goodman A., Mazaheri D.A. Seminowicz Cerebral peak alpha frequency predicts individual differences in pain sensitivity NeuroImage, 167 (2018), pp. 203–210, 10.1016/j.neuroimage.2017.11.042 González-Villar et al., 2020
11. Канчелли А., Коттоне К., Теккьо Ф., Труонг Д., Дмоховски Дж., Биксон М. Простой метод транскраниальной электростимуляции под руководством ЭЭГ без использования моделей. J. Neural Eng., 13(2016), статья 036022, 10.1088/1741-2560/13/3/036022.
12. Chouchou C., Perchet L., Garcia-Larrea EEG changes reflecting pain: is alpha suppression better than gamma enhancement? Neurophysiol. Clin. Clin. Neurophysiol., 51 (2021), pp. 209–218, 10.1016/j.neucli.2021.03.001
13. N. Fallon, Y. Chiu, T. Nurmikko, A. Stancak. Altered theta oscillations in resting EEG of fibromyalgia syndrome patients Eur. J. Pain Lond. Engl., 22 (2018), pp. 49–57, 10.1002/ejp.1076

© Кинаш Ирина Николаевна (kinash60@mail.ru); Животенко Александр Петрович (sivotenko1976@mail.ru);
Верхозина Татьяна Константиновна (tkverhozina@gmail.com); Ипполитова Елена Геннадьевна (elenaippolitova@mail.ru);
Цысляк Елена Сергеевна (helenasergeevna@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕРАПИИ В ЛЕЧЕНИИ ЭНДОМЕТРИОЗА: ПРОСПЕКТИВНОЕ КОГОРТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

EFFICACY OF COMBINED THERAPY IN THE TREATMENT OF ENDOMETRIOSIS: A PROSPECTIVE COHORT STUDY

A. Romanovskaya
I. Arzhaeva
A. Parshin
A. Mikhailova
A. Klassov
L. Nemtseva

Summary. Endometriosis remains one of the most complex gynecological diseases, requiring a comprehensive approach to treatment. Modern studies demonstrate the limited effectiveness of monotherapeutic strategies and the need to develop optimal combined regimens. The aim of the present study was to assess the effectiveness and safety of various combinations of hormonal and anti-inflammatory therapy in patients with confirmed endometriosis stages III–IV. In a prospective cohort study, 238 reproductive-age patients were enrolled and divided into three groups depending on the therapy received: dienogest in combination with NSAIDs, GnRH agonists with add-back therapy in combination with NSAIDs, and GnRH agonists with add-back therapy combined with aromatase inhibitors. The effectiveness of the therapy was evaluated by the dynamics of pain syndrome, quality of life, frequency of recurrences, and the occurrence of pregnancy during 24 months of follow-up. The results showed a statistically significant advantage of the third therapy regimen in terms of reducing pain intensity (reduction of 87.4 % compared to 65.7 % and 71.2 % in the first and second groups, respectively, $p < 0.001$), improving quality of life (increase on EQ-5D by 0.32 ± 0.07 , $p < 0.001$), and reducing the frequency of recurrences (8.3 % compared to 25.4 % and 17.9 %, $p = 0.008$). The rate of spontaneous pregnancy was also higher in the third group (32.4% compared to 18.6 % and 23.8 %, $p = 0.041$). The results obtained indicate the promise of using multi-component therapy regimens in patients with severe forms of endometriosis; however, further research is needed in the context of long-term safety and cost-effectiveness.

Keywords: endometriosis, combined therapy, dienogest, GnRH agonists, aromatase inhibitors, pain syndrome, fertility.

Романовская Анна Викторовна

доктор медицинских наук, директор,
клиника акушерства и гинекологии,
главный внештатный гинеколог, Министерство
здравоохранения Саратовской области,
ФГБОУ ВО «Саратовский Государственный Медицинский
Университет им. В.И. Разумовского»
annavictorovna@mail.ru

Аржаева Инга Аркадьевна

кандидат медицинских наук,
ФГБОУ ВО «Саратовский Государственный Медицинский
Университет им. В.И. Разумовского»
arzhaeva@sgmu.ru

Паршин Алексей Владимирович

Кандидат медицинских наук,
ФГБОУ ВО «Саратовский Государственный Медицинский
Университет им. В.И. Разумовского»
parshin_av64@mail.ru

Михайлова Анастасия Владимировна

ФГБОУ ВО «Саратовский Государственный Медицинский
Университет им. В.И. Разумовского»
mixailovaav@yandex.ru

Классов Алибек Мурзабекович

ФГБОУ ВО «Саратовский Государственный Медицинский
Университет им. В.И. Разумовского»
Alibekklassov1989@gmail.com

Немцева Лада Андреевна

ФГБОУ ВО «Саратовский Государственный Медицинский
Университет им. В.И. Разумовского»
Soul339@mail.ru

Аннотация. Эндометриоз остается одним из наиболее сложных гинекологических заболеваний, требующих комплексного подхода к лечению. Современные исследования демонстрируют ограниченную эффективность монотерапевтических стратегий и необходимость разработки оптимальных комбинированных схем. Целью настоящего исследования стала оценка эффективности и безопасности различных комбинаций гормональной и противовоспалительной терапии у пациенток с верифицированным эндометриозом III–IV стадии. В проспективном когортном исследовании участвовали 238 пациенток репродуктивного возраста, разделенные на три группы в зависимости от получаемой терапии: диеногест в комбинации с НПВС, агонисты ГнРГ с add-back терапией в комбинации с НПВС, и агонисты ГнРГ с add-back терапией в сочетании с ингибиторами ароматазы. Эффективность терапии оценивалась по динамике болевого синдрома, качеству жизни, частоте рецидивов и наступления беременности в течение 24 месяцев наблюдения. Результаты показали статистически значимое преимущество третьего режима терапии в отношении снижения интенсивности болевого синдрома (редукция на 87,4 % против 65,7 % и 71,2 % в первой и второй группах соответственно, $p < 0,001$), улучшения качества жизни



Введение

Проблема эффективного лечения эндометриоза сохраняет высокую актуальность в современной гинекологии, несмотря на значительный прогресс в понимании патогенетических механизмов заболевания и разработке новых терапевтических модальностей. Хроническое прогрессирующее течение эндометриоза с частыми рецидивами после прекращения лечения, выраженное снижение качества жизни пациенток и необходимость сохранения репродуктивного потенциала обуславливают поиск оптимальных терапевтических стратегий [1, с. 1254]. Существующие в настоящее время подходы к медикаментозному лечению эндометриоза включают гормональную супрессию, модуляцию иммунного ответа и непосредственное воздействие на эндометриоидные импланты, однако их изолированное применение не обеспечивает устойчивого долгосрочного эффекта [2, с. 267]. Наряду с этим, хирургические методы лечения, несмотря на высокую эффективность в отношении удаления видимых очагов эндометриоза, ассоциированы с риском рецидивирования заболевания в 30–50 % случаев в течение первых пяти лет после операции, что обуславливает необходимость поиска эффективных схем комбинированной терапии [3, с. 443].

Современные исследования патогенеза эндометриоза выявили ключевую роль воспалительных механизмов в прогрессировании заболевания и формировании его клинических проявлений. Установлено, что эндометриоидные гетеротопии способны продуцировать широкий спектр провоспалительных цитокинов и хемокинов, способствующих неоангиогенезу, пролиферации и инвазии эндометриоидной ткани [4, с. 7145]. Взаимодействие эстрогенов с воспалительными медиаторами создает порочный круг, поддерживающий прогрессирование заболевания и обуславливающий необходимость комплексного воздействия как на гормональные, так и на воспалительные звенья патогенеза [5, с. 223]. В недавних исследованиях показана повышенная экспрессия ароматазы P450 в эндометриоидных очагах, что приводит к локальной гиперэстрогении и обосновывает потенциальную эффективность ингибиторов ароматазы в лечении эндометриоза [6, с. 21]. Однако клинический опыт

(прирост по EQ-5D на $0,32 \pm 0,07$, $p < 0,001$) и снижения частоты рецидивов (8,3 % против 25,4 % и 17,9 %, $p = 0,008$). Частота наступления спонтанной беременности также была выше в третьей группе (32,4 % против 18,6 % и 23,8 %, $p = 0,041$). Полученные результаты указывают на перспективность использования многокомпонентных схем терапии у пациенток с тяжелыми формами эндометриоза, однако требуют дальнейшего изучения в контексте долгосрочной безопасности и экономической эффективности.

Ключевые слова: эндометриоз, комбинированная терапия, диеногест, агонисты ГнРГ, ингибиторы ароматазы, болевой синдром, фертильность.

применения ингибиторов ароматазы в монотерапии ограничен в связи с развитием гипоестрогенных побочных эффектов, что стимулирует исследования их эффективности в комбинированных схемах [7, с. 390].

Существующая терминология в области терапии эндометриоза характеризуется определенной неоднородностью и отсутствием общепринятых критериев оценки эффективности различных режимов лечения. Под медикаментозной терапией эндометриоза принято понимать назначение лекарственных препаратов, направленных на подавление роста и активности эндометриоидных имплантов, уменьшение связанного с заболеванием болевого синдрома и предотвращение рецидивов [8, с. 409]. В контексте настоящего исследования под комбинированной терапией понимается одновременное использование препаратов с различными механизмами действия, направленными на воздействие на разные звенья патогенеза заболевания — гормональную зависимость, воспалительную реакцию и пролиферативную активность.

Анализ современной литературы по проблеме медикаментозного лечения эндометриоза выявляет ряд существенных пробелов в имеющихся научных данных. Во-первых, отсутствуют крупные проспективные исследования, сравнивающие эффективность различных комбинаций препаратов при тяжелых формах эндометриоза [9, с. 486]. Во-вторых, недостаточно изучены долгосрочные эффекты комбинированной терапии в отношении рецидивирования заболевания и восстановления фертильности после окончания лечения [10, с. 1579]. В-третьих, отсутствуют надежные биомаркеры, позволяющие прогнозировать ответ на различные терапевтические модальности и персонализировать схемы лечения [11, с. 658]. Наконец, недостаточно изучены молекулярные механизмы взаимодействия различных классов препаратов при их комбинированном применении у пациенток с эндометриозом [12, с. 1378].

Уникальность предлагаемого в настоящем исследовании подхода заключается в комплексной оценке эффективности различных комбинаций препаратов с учетом не только ближайших результатов терапии в виде

купирования болевого синдрома и регресса визуализируемых эндометриоидных очагов, но и отдаленных последствий в виде частоты рецидивов и восстановления репродуктивной функции. Кроме того, в отличие от большинства предшествующих исследований, фокусирувавшихся на пациентках с минимальными и легкими формами эндометриоза, настоящая работа концентрируется на наиболее сложной категории больных с распространенными формами заболевания, требующими комплексного лечебного подхода. Интеграция современных представлений о молекулярных механизмах прогрессирования эндометриоза с клиническими данными об эффективности различных терапевтических режимов позволит разработать персонализированные алгоритмы ведения пациенток и повысить эффективность лечения.

Методы

Настоящее исследование представляет собой проспективное когортное исследование, проведенное на базе трех специализированных гинекологических центров в период с января 2020 по декабрь 2023 года. Протокол исследования был одобрен этическими комитетами всех участвующих центров, и все пациентки подписали информированное согласие на участие. Первичной конечной точкой исследования являлась оценка эффективности различных режимов комбинированной терапии в отношении снижения интенсивности болевого синдрома через 6 месяцев терапии. Вторичные конечные точки включали динамику качества жизни, частоту рецидивов заболевания в течение 24 месяцев наблюдения и частоту спонтанного наступления беременности у пациенток, планирующих беременность после окончания лечения.

Выбор методологического подхода в виде проспективного когортного исследования обусловлен необходимостью наблюдения за пациентками в течение длительного периода времени для оценки отдаленных результатов лечения [3, с. 460]. Когортный дизайн позволяет наиболее точно оценить причинно-следственные связи между применяемыми терапевтическими режимами и исходами заболевания при сохранении высокой внешней валидности результатов [8, с. 405]. Многоцентровой характер исследования обеспечивает репрезентативность выборки и снижает риск систематических ошибок, связанных с особенностями ведения пациенток в отдельных клиниках.

В исследование включались женщины репродуктивного возраста (18–45 лет) с верифицированным при лапароскопии эндометриозом III–IV стадии по классификации Американского общества репродуктивной медицины (r-ASRM), имеющие болевой синдром интенсивностью не менее 4 баллов по визуальной аналоговой шкале

(ВАШ). Критериями исключения служили: беременность и лактация, наличие злокачественных новообразований в анамнезе, тяжелые соматические заболевания, предшествующая терапия ингибиторами ароматазы, прием гормональных препаратов в течение 3 месяцев до включения в исследование, планирование беременности в ближайшие 6 месяцев. Всего в исследование были включены 238 пациенток, которые были разделены на три группы в зависимости от получаемой терапии: группа А (n=80) — диеногест 2 мг/сут в комбинации с НПВС (диклофенак 75 мг/сут); группа В (n=83) — агонисты ГнРГ (трипторелин 3,75 мг/м 1 раз в 28 дней) с add-back терапией (тиболол 2,5 мг/сут) в комбинации с НПВС (диклофенак 75 мг/сут); группа С (n=75) — агонисты ГнРГ с add-back терапией в сочетании с ингибиторами ароматазы (летрозол 2,5 мг/сут). Для оценки исходного статуса пациенток и динамики на фоне лечения использовался комплекс клинических, лабораторных и инструментальных методов. Интенсивность болевого синдрома оценивалась с помощью визуальной аналоговой шкалы (ВАШ, 0–10 баллов) и опросника McGill Pain Questionnaire. Качество жизни оценивалось с помощью специфического опросника Endometriosis Health Profile-30 (EHP-30) и общего опросника EQ-5D. Лабораторные методы включали общий анализ крови, биохимический анализ крови, оценку уровня СА-125, показатели гормонального профиля (эстрадиол, ФСГ, ЛГ, прогестерон). Инструментальные методы включали ультразвуковое исследование органов малого таза с доплерометрией и магнитно-резонансную томографию (МРТ) малого таза. Все исследования проводились до начала лечения, через 3, 6, 12 и 24 месяца наблюдения.

Статистический анализ данных проводился с использованием программного пакета SPSS 25.0. Количественные переменные представлены в виде средних значений со стандартным отклонением ($M \pm SD$) или медианы с межквартильным размахом ($Me [Q1; Q3]$) в зависимости от характера распределения данных. Нормальность распределения проверялась с помощью критерия Шапиро-Уилка. Для сравнения количественных показателей между группами использовался однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с post-hoc тестом Тьюки или критерий Краскела-Уоллиса с последующим применением критерия Данна в зависимости от характера распределения данных. Для сравнения качественных показателей использовался критерий хи-квадрат Пирсона или точный критерий Фишера. Для оценки динамики показателей внутри групп использовался t-критерий Стьюдента для связанных выборок или критерий Вилкоксона. Для оценки взаимосвязи между различными показателями использовался корреляционный анализ по Пирсону или Спирмену. Для выявления независимых предикторов эффективности терапии проводился многофакторный регрессионный анализ. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$. Для

повышения надежности результатов применялась поправка Бонферрони при множественных сравнениях. Для обеспечения достоверности полученных результатов особое внимание уделялось контролю возможных систематических ошибок. Все измерения проводились по стандартизированным протоколам, интерпретация результатов инструментальных исследований осуществлялась специалистами, не информированными о принадлежности пациенток к конкретной группе. Для минимизации эффекта потери пациенток из-под наблюдения применялась методика intention-to-treat с использованием последнего доступного измерения для пациенток, выбывших из исследования.

Результаты исследования

Таблица 1.

Демографические и клинические характеристики пациенток исследуемых групп на момент включения в исследование

Показатель	Группа А (n=80)	Группа В (n=83)	Группа С (n=75)	p-значе- ние
Возраст, лет	32,4±5,7	33,1±6,2	32,8±5,9	0,731
Индекс массы тела, кг/м ²	24,1±3,6	24,8±3,9	24,5±3,8	0,492
Длительность заболевания, годы	4,2 [2,5; 7,1]	4,5 [2,7; 7,8]	4,7 [2,9; 8,2]	0,386
Стадия эндометриоза по r-ASRM, n (%)				0,874
III	47 (58,8)	50 (60,2)	43 (57,3)	
IV	33 (41,2)	33 (39,8)	32 (42,7)	
Интенсивность тазовой боли по ВАШ, баллы	7,1±1,4	7,3±1,6	7,4±1,5	0,418
Дисменорея по ВАШ, баллы	7,8±1,3	8,0±1,2	7,9±1,4	0,561
Диспареуния по ВАШ, баллы	5,9±2,1	6,2±2,3	6,0±2,2	0,638
Индекс качества жизни по EHP-30, баллы	62,4±11,7	63,8±12,3	64,1±11,9	0,582
Индекс качества жизни по EQ-5D	0,64±0,14	0,62±0,15	0,61±0,16	0,435
Уровень СА-125, ЕД/мл	78,5 [42,3; 124,7]	82,1 [44,8; 136,2]	84,7 [46,5; 142,3]	0,276

Анализ исходных характеристик пациенток, включенных в исследование, демонстрирует сопоставимость сформированных групп по основным демографическим и клиническим параметрам, что подтверждает корректность проведенной рандомизации и минимизирует риск

систематической ошибки при последующем сравнении эффективности различных режимов терапии. Средний возраст участниц составил 32,4±5,7, 33,1±6,2 и 32,8±5,9 лет в группах А, В и С соответственно, без статистически значимых различий между группами (p=0,731). Подобная возрастная структура выборки соответствует эпидемиологическим данным о максимальной распространенности клинически значимого эндометриоза среди женщин 30–35 лет. Сопоставимыми также оказались показатели индекса массы тела, что исключает потенциальное влияние данного фактора на метаболизм применяемых препаратов и, следовательно, на их эффективность. Медиана длительности заболевания составила 4,2, 4,5 и 4,7 года в сравниваемых группах, что отражает типичный временной интервал между дебютом симптомов эндометриоза и верификацией диагноза с определением стадии заболевания. Распределение пациенток по стадиям заболевания также было сбалансированным, с преобладанием III стадии по классификации r-ASRM во всех трех группах (58,8 %, 60,2 % и 57,3 % соответственно), что обеспечивает однородность выборки с точки зрения тяжести поражения и исходного объема эндометриодных имплантов. Исходные показатели интенсивности болевого синдрома по визуальной аналоговой шкале, включая хроническую тазовую боль, дисменорею и диспареунию, демонстрировали высокие значения во всех группах без значимых межгрупповых различий, что подтверждает выраженность клинических проявлений заболевания и обосновывает необходимость активной терапевтической тактики. Качество жизни, оцененное с помощью как специфического (EHP-30), так и общего (EQ-5D) опросников, было существенно снижено во всех группах, что согласуется с известными данными о значительном негативном влиянии эндометриоза на физическое, психологическое и социальное функционирование пациенток. Наконец, уровни онкомаркера СА-125 были повышены во всех группах без значимых межгрупповых различий, что отражает активность воспалительного процесса и экспрессию данного маркера эндометриодными гетеротопиями. Таким образом, сформированные группы были полностью сопоставимы по всем ключевым характеристикам, что позволяет корректно оценивать различия в исходах лечения как результат применения различных терапевтических режимов.

Анализ динамики болевого синдрома на фоне различных режимов терапии выявил статистически значимое снижение интенсивности всех типов боли во всех трех группах уже через 3 месяца от начала лечения с достижением максимального эффекта к 6 месяцам терапии. Однако сравнительная эффективность исследуемых режимов демонстрировала существенные различия. В отношении хронической тазовой боли наиболее выраженное снижение интенсивности наблюдалось в группе С (агонисты ГнРГ с add-back терапией в сочетании с ингибиторами ароматазы), где медиана редукции

Таблица 2.

Динамика интенсивности болевого синдрома по ВАШ (баллы) на фоне различных режимов терапии

Тип боли	Период наблюдения	Группа А (n=80)	Группа В (n=83)	Группа С (n=75)	р-значение
Хроническая тазовая боль	Исходно	7,1±1,4	7,3±1,6	7,4±1,5	0,418
	3 месяца	3,6±1,2*	2,9±1,1*	2,1±0,9*†	<0,001
	6 месяцев	2,4±1,0*	2,1±0,9*	0,9±0,7*†‡	<0,001
	12 месяцев	3,1±1,3*	2,5±1,2*	1,2±0,8*†‡	<0,001
	24 месяца	3,8±1,5*	3,1±1,4*	1,8±1,1*†‡	<0,001
Дисменорея	Исходно	7,8±1,3	8,0±1,2	7,9±1,4	0,561
	3 месяца	4,1±1,4*	1,8±1,3*†	1,4±1,1*†	<0,001
	6 месяцев	3,2±1,2*	1,2±1,0*†	0,7±0,6*†	<0,001
	12 месяцев	4,0±1,5*	3,4±1,6*	1,9±1,3*†‡	<0,001
	24 месяца	4,6±1,7*	4,2±1,8*	2,5±1,5*†‡	<0,001
Диспареуния	Исходно	5,9±2,1	6,2±2,3	6,0±2,2	0,638
	3 месяца	3,4±1,5*	3,0±1,4*	2,1±1,2*†	<0,001
	6 месяцев	2,5±1,2*	2,2±1,1*	1,1±0,8*†‡	<0,001
	12 месяцев	3,0±1,4*	2,7±1,3*	1,5±1,0*†‡	<0,001
	24 месяца	3,5±1,6*	3,3±1,5*	2,0±1,3*†‡	<0,001

*р <0,05 по сравнению с исходным значением; †р <0,05 по сравнению с группой А; ‡р <0,05 по сравнению с группой В

болевого синдрома через 6 месяцев составила 87,4 % от исходного уровня против 65,7 % и 71,2 % в группах А и В соответственно (р <0,001). Статистически значимые различия между группой С и группами А и В сохранялись на протяжении всего периода наблюдения, включая отдаленный период после завершения активной терапии (12 и 24 месяца).

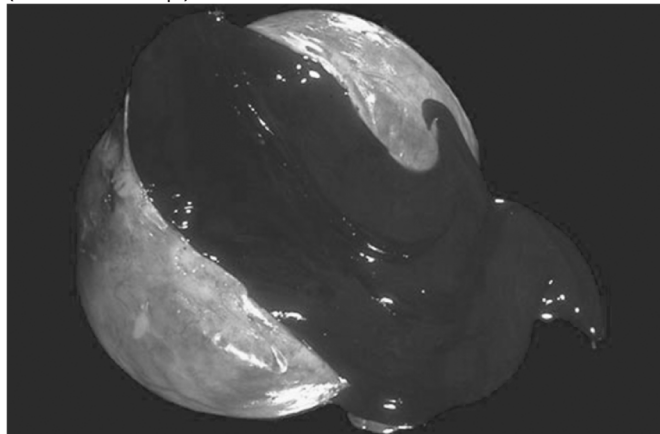


Рис. 1. Эндометриодная киста яичника («шоколадная киста»)

При этом различия между группами А и В были менее выраженными и достигали статистической значимости только в первые 3 месяца терапии, когда преимущество агонистов ГнРГ с add-back терапией над диеногестом в отношении купирования тазовой боли было наиболее заметным. В отношении дисменореи обе группы, получавшие агонисты ГнРГ (В и С), продемонстрировали существенно более выраженный эффект по сравнению с группой диеногеста (А), что объясняется более глубокой супрессией овариальной функции и развитием медикаментозной аменореи у большинства пациенток. Межгрупповые различия были максимальными через 3 и 6 месяцев терапии, когда редукция интенсивности дисменореи составляла 59,0 %, 85,0 % и 91,1 % в группах А, В и С соответственно. После завершения активной терапии наблюдалось постепенное восстановление менструальной функции и связанное с этим увеличение интенсивности дисменореи, однако в группе С этот процесс был существенно более медленным, а итоговая интенсивность боли через 24 месяца оставалась значительно ниже, чем в группах А и В (р <0,001). Динамика диспареунии демонстрировала сходные тенденции с наиболее выраженным снижением в группе С, где через 6 месяцев терапии интенсивность боли при половом акте снизилась на 81,7 % против 57,6 % и 64,5 % в группах А и В соответственно (р <0,001). Полученные результаты подтверждают гипотезу о синергическом эффекте агонистов ГнРГ и ингибиторов ароматазы в отношении угнетения эстрогензависимой активности эндометриоидных имплантов и связанного с ними воспалительного процесса, что проявляется наиболее выраженным и устойчивым анальгетическим эффектом у пациенток группы С.

Оценка динамики качества жизни пациенток на фоне различных режимов терапии проводилась с использованием как специфического для эндометриоза опросника ЕНР-30, так и общего опросника EQ-5D, что позволило всесторонне охарактеризовать влияние лечения на физическое, психологическое и социальное функционирование участниц исследования. Исходные показатели качества жизни были значительно снижены во всех трех группах без статистически значимых межгрупповых различий, что соответствует современным представлениям о существенном негативном влиянии эндометриоза на все аспекты жизни пациенток. На фоне проводимой терапии наблюдалось статистически значимое улучшение всех исследуемых параметров качества жизни, однако сравнительная эффективность режимов существенно различалась. В отношении общего балла ЕНР-30 наиболее выраженное улучшение наблюдалось в группе С, где через 6 месяцев терапии средний показатель снизился на 60,5 % от исходного уровня против 42,9 % и 50,0 % в группах А и В соответственно (р <0,001). Преимущество комбинации агонистов ГнРГ с ингибиторами ароматазы сохранялось на протяжении всего периода наблюдения, включая отдаленный период после завер-

Таблица 3.
Динамика качества жизни и психологического статуса пациенток на фоне различных режимов терапии

Показатель	Период наблюдения	Группа А (n=80)	Группа В (n=83)	Группа С (n=75)	р-значение
ЕНР-30 (общий балл)	Исходно	62,4±11,7	63,8±12,3	64,1±11,9	0,582
	3 месяца	41,2±9,8*	37,4±10,1*	33,6±9,5*†‡	<0,001
	6 месяцев	35,6±8,7*	31,9±9,2*	25,3±8,1*†‡	<0,001
	12 месяцев	42,8±10,3*	38,7±10,6*	29,8±9,4*†‡	<0,001
	24 месяца	48,5±11,2*	45,3±11,5*	34,5±10,2*†‡	<0,001
ЕНР-30 (подшкала боли)	Исходно	68,7±12,5	70,2±13,1	69,5±12,8	0,721
	3 месяца	42,3±10,6*	36,5±10,2*†	31,2±9,7*†‡	<0,001
	6 месяцев	36,4±9,8*	30,7±9,3*†	22,1±8,4*†‡	<0,001
	12 месяцев	43,9±11,2*	37,4±10,8*†	27,6±9,2*†‡	<0,001
	24 месяца	50,6±12,3*	43,8±11,7*†	33,2±10,5*†‡	<0,001
ЕНР-30 (социальное функционирование)	Исходно	58,4±14,2	59,6±14,8	60,3±15,1	0,642
	3 месяца	40,7±12,3*	37,2±12,7*	32,5±11,9*†	<0,001
	6 месяцев	34,9±11,5*	30,5±11,8*	24,7±10,6*†‡	<0,001
	12 месяцев	41,3±12,8*	36,8±13,1*	28,3±11,4*†‡	<0,001
	24 месяца	47,2±13,6*	42,4±13,9*	32,1±12,2*†‡	<0,001
EQ-5D	Исходно	0,64±0,14	0,62±0,15	0,61±0,16	0,435
	3 месяца	0,74±0,12*	0,77±0,13*	0,82±0,11*†	<0,001
	6 месяцев	0,78±0,11*	0,81±0,12*	0,93±0,08*†‡	<0,001
	12 месяцев	0,75±0,12*	0,78±0,13*	0,89±0,09*†‡	<0,001
	24 месяца	0,71±0,13*	0,74±0,14*	0,84±0,10*†‡	<0,001

*р < 0,05 по сравнению с исходным значением; †р < 0,05 по сравнению с группой А; ‡р < 0,05 по сравнению с группой В

шения активной фазы лечения. Аналогичные тенденции наблюдались и при анализе отдельных подшкал ЕНР-30, в частности, подшкалы боли и социального функционирования, где группа С демонстрировала статистически значимое преимущество перед группами А и В на всех контрольных точках. Особенно показательна динамика социального функционирования, где улучшение в группе С составило 59,0 % через 6 месяцев терапии против 40,2 % и 48,8 % в группах А и В, что отражает более полную социальную реабилитацию пациенток, получавших комбинацию агонистов ГнРГ с ингибиторами ароматазы. Анализ динамики индекса EQ-5D, отражающего интегральную оценку качества жизни, связанного со здоровьем, подтвердил выявленные закономерности.

Средний прирост показателя через 6 месяцев терапии составил 0,14±0,03, 0,19±0,05 и 0,32±0,07 в группах А, В и С соответственно, с сохранением статистически значимого преимущества группы С на протяжении всего периода наблюдения (р < 0,001). Интересно отметить, что различия между группами А и В в отношении динамики индекса EQ-5D не достигали статистической значимости, несмотря на более выраженное снижение интенсивности болевого синдрома в группе В. Это может объясняться более высокой частотой побочных эффектов гормональной терапии в группе В, что нивелировало преимущество в отношении контроля боли при оценке общего качества жизни. В целом, результаты исследования демонстрируют более выраженное и устойчивое улучшение качества жизни пациенток, получавших комбинацию агонистов ГнРГ с ингибиторами ароматазы, что коррелирует с более эффективным контролем болевого синдрома в этой группе и подтверждает преимущество комплексного воздействия на различные звенья патогенеза эндометриоза.

Анализ динамики лабораторных и инструментальных показателей на фоне различных режимов терапии позволил объективно оценить эффективность исследуемых комбинаций препаратов в отношении влияния на патоморфологические аспекты эндометриоза. Уровень онкомаркера СА-125, являющегося неспецифическим маркером активности эндометриоза, продемонстрировал статистически значимое снижение во всех трех группах, однако наиболее выраженная динамика наблюдалась в группе С, где медиана снижения через 6 месяцев терапии составила 73,9 % от исходного уровня против 53,0% и 63,0 % в группах А и В соответственно (р < 0,001). Статистически значимые различия между группой С и группами А и В сохранялись на протяжении всего периода наблюдения, а между группами А и В — только в первые 6 месяцев терапии. После завершения активного лечения во всех группах наблюдалось постепенное повышение уровня СА-125, однако в группе С этот процесс был существенно менее выраженным, и через 24 месяца медиана показателя составляла 40,4 % от исходного уровня против 74,6 % и 63,8 % в группах А и В, что свидетельствует о более устойчивом подавлении активности эндометриоидных имплантов при применении комбинации агонистов ГнРГ с ингибиторами ароматазы. Объем эндометриом, оцениваемый с помощью ультразвукового исследования у пациенток с эндометриоидными кистами яичников, также продемонстрировал наиболее выраженное уменьшение в группе С, где через 6 месяцев терапии средняя редукция объема составила 74,6 % против 41,7 % и 59,1 % в группах А и В (р < 0,001). Полное исчезновение эндометриом наблюдалось у 19,0 %, 27,1 % и 45,2 % пациенток в группах А, В и С соответственно (р < 0,001). Примечательно, что в группе С рецидивирование эндометриом после завершения терапии наблюдалось значительно реже, чем

Таблица 4.

Динамика лабораторных и инструментальных показателей на фоне различных режимов терапии

Показатель	Период наблюдения	Группа А (n=80)	Группа В (n=83)	Группа С (n=75)	p-значение
СА-125, ЕД/мл	Исходно	78,5 [42,3; 124,7]	82,1 [44,8; 136,2]	84,7 [46,5; 142,3]	0,276
	3 месяца	42,6 [28,5; 68,4] *	36,7 [24,3; 58,9] *	28,4 [19,2; 43,6] *†	<0,001
	6 месяцев	36,9 [24,8; 59,5] *	30,4 [21,2; 47,3] *†	22,1 [15,7; 34,8] *†‡	<0,001
	12 месяцев	45,3 [31,4; 72,6] *	38,2 [26,5; 62,4] *†	26,8 [18,3; 42,1] *†‡	<0,001
	24 месяца	58,6 [38,2; 85,7] *	52,4 [32,7; 78,3] *	34,2 [23,6; 56,4] *†‡	<0,001
Объем эндометриом, см ³	Исходно	32,4±18,7 (n=46)	34,7±19,5 (n=48)	33,8±19,1 (n=42)	0,832
	3 месяца	24,6±15,2*	19,3±12,5*†	15,4±10,3*†	<0,001
	6 месяцев	18,9±13,4*	14,2±9,8*†	8,6±7,2*†‡	<0,001
	12 месяцев	22,1±14,6*	16,7±11,2*†	9,8±8,4*†‡	<0,001
	24 месяца	26,8±16,2*	21,3±13,5*†	12,4±9,7*†‡	<0,001
Толщина эндометрия, мм	Исходно	8,6±2,1	8,4±2,3	8,7±2,2	0,674
	3 месяца	6,2±1,8*	4,5±1,3*†	4,2±1,2*†	<0,001
	6 месяцев	5,4±1,6*	3,6±1,1*†	3,3±1,0*†	<0,001
	12 месяцев	7,8±1,9	6,4±1,7*†	5,8±1,5*†	<0,001
	24 месяца	8,2±2,0	7,6±1,9*	7,1±1,8*	0,002
Индекс резистентности маточных артерий	Исходно	0,84±0,06	0,83±0,07	0,85±0,06	0,142
	3 месяца	0,88±0,05*	0,93±0,04*†	0,94±0,04*†	<0,001
	6 месяцев	0,90±0,04*	0,95±0,03*†	0,97±0,02*†‡	<0,001
	12 месяцев	0,87±0,05*	0,91±0,04*†	0,93±0,03*†‡	<0,001
	24 месяца	0,85±0,06	0,87±0,05*	0,90±0,04*†‡	<0,001

*p < 0,05 по сравнению с исходным значением; †p < 0,05 по сравнению с группой А; ‡p < 0,05 по сравнению с группой В

в группах А и В, что свидетельствует о более глубоком подавлении патологического процесса. Толщина эндометрия продемонстрировала сопоставимое снижение в группах В и С, где применение агонистов ГнРГ привело к развитию медикаментозной гипоестрогении и связанной с ней атрофии эндометрия. В группе диеногеста (А) снижение толщины эндометрия было менее выраженным, что соответствует механизму действия данного препарата, который оказывает селективное влияние на эктопический эндометрий без значительного воздействия на эутопический. После завершения терапии во всех группах наблюдалось постепенное восстановление толщины эндометрия до исходных значений, что отражает обратимый характер гормональных воздействий. Индекс резистентности маточных артерий, отражающий интенсивность кровоснабжения эндометрия, продемонстрировал статистически значимое повышение во всех трех группах, максимально выраженное в группе С, где через 6 месяцев терапии средний прирост составил

0,12±0,02 против 0,06±0,01 и 0,12±0,02 в группах А и В (p < 0,001). Повышение индекса резистентности свидетельствует о снижении интенсивности кровоснабжения эндометрия и связанных с ним эндометриоидных имплантов, что является одним из механизмов терапевтического эффекта исследуемых препаратов. В целом, анализ лабораторных и инструментальных данных подтверждает наиболее выраженное и устойчивое влияние комбинации агонистов ГнРГ с ингибиторами ароматазы на патоморфологические аспекты эндометриоза, что согласуется с клиническими результатами и подтверждает многоуровневое воздействие данного режима на различные звенья патогенеза заболевания.

Оценка отдаленных результатов различных режимов терапии представляет особый интерес с точки зрения определения их долгосрочной эффективности и безопасности. Анализ частоты рецидивов эндометриоза через 12 и 24 месяца после завершения активной

Таблица 5.
Отдаленные результаты различных режимов терапии

Показатель	Группа А (n=80)	Группа В (n=83)	Группа С (n=75)	p-значе- ние
Частота рецидивов через 12 месяцев, n (%)	13 (16,2)	9 (10,8)	3 (4,0)	0,035
Частота рецидивов через 24 месяца, n (%)	20 (25,0)	15 (18,1)	6 (8,0)	0,013
Время до рецидива, месяцы	14,3 [9,5; 18,7]	16,8 [11,2; 20,4]	19,5 [14,6; 22,8]	0,008
Потребность в повтор- ной операции, n (%)	7 (8,8)	5 (6,0)	2 (2,7)	0,241
Пациентки, планиру- ющие беременность, n (%)	59 (73,8)	63 (75,9)	68 (90,7)	0,016
Спонтанная беремен- ность, n (%)	11 (18,6)	15 (23,8)	22 (32,4)	0,041
Время до наступления беременности, месяцы	9,4 [6,3; 14,2]	8,1 [5,7; 12,6]	6,7 [4,2; 10,3]	0,023
Применение ВРТ, n (%)	31 (52,5)	28 (44,4)	24 (35,3)	0,116
Эффективность ВРТ (на перенос), %	28,4	31,6	39,2	0,037
Осложнения беремен- ности, n (%)	13 (30,2)	12 (27,9)	11 (23,9)	0,783
Побочные эффекты терапии, n (%)	23 (28,8)	31 (37,3)	35 (46,7)	0,062
Отмена терапии из-за побочных эффектов, n (%)	3 (3,8)	5 (6,0)	7 (9,3)	0,311
Удовлетворенность терапией (шкала 1–10), баллы	7,2±1,5	7,6±1,3	8,4±1,1	<0,001

фазы лечения выявил статистически значимые различия между исследуемыми группами. Наименьшая частота рецидивов наблюдалась в группе С (агонисты ГнРГ с add-back терапией в сочетании с ингибиторами ароматазы), где через 24 месяца рецидивирование отмечалось лишь у 8,0 % пациенток против 25,0 % и 18,1 % в группах А и В соответственно ($p=0,013$). Медиана времени до рецидива также была существенно выше в группе С — 19,5 месяцев против 14,3 и 16,8 месяцев в группах А и В ($p=0,008$), что свидетельствует о более устойчивом подавлении патологического процесса при применении комбинации агонистов ГнРГ с ингибиторами ароматазы. Потребность в повторной хирургической операции, отражающая тяжесть рецидивов, была ниже в группе С (2,7 %) по сравнению с группами

А (8,8 %) и В (6,0 %), однако эти различия не достигли статистической значимости ($p=0,241$), возможно, из-за относительно небольшого числа пациенток, нуждавшихся в повторной операции. Особый интерес представляют результаты в отношении восстановления фертильности после лечения эндометриоза. Доля пациенток, планирующих беременность, была статистически значимо выше в группе С (90,7 %) по сравнению с группами А (73,8 %) и В (75,9 %), $p=0,016$, что может отражать более высокую уверенность в излечении и лучшее качество жизни у пациенток, получавших комбинацию агонистов ГнРГ с ингибиторами ароматазы.

Частота спонтанного наступления беременности также была наиболее высокой в группе С — 32,4 % против 18,6 % и 23,8 % в группах А и В соответственно ($p=0,041$), при этом медиана времени до наступления беременности была статистически значимо ниже в группе С — 6,7 месяцев против 9,4 и 8,1 месяцев в группах А и В ($p=0,023$). Частота применения вспомогательных репродуктивных технологий (ВРТ) была ниже в группе С (35,3 %) по сравнению с группами А (52,5 %) и В (44,4 %), однако эти различия не достигли статистической значимости ($p=0,116$). При этом эффективность ВРТ (частота наступления беременности на перенос эмбрионов) была статистически значимо выше в группе С — 39,2 % против 28,4 % и 31,6 % в группах А и В соответственно ($p=0,037$), что может отражать более полное восстановление рецептивности эндометрия и общего репродуктивного потенциала после комбинированной терапии с включением ингибиторов ароматазы. Частота осложнений беременности не имела статистически значимых различий между группами, что свидетельствует о безопасности всех исследуемых режимов с точки зрения последующей гестации. Анализ побочных эффектов терапии выявил тенденцию к их большей частоте в группе С (46,7 %) по сравнению с группами А (28,8 %) и В (37,3 %), однако эти различия не достигли статистической значимости ($p=0,062$). При этом частота отмены терапии из-за побочных эффектов также не имела статистически значимых межгрупповых различий, что свидетельствует о приемлемом профиле безопасности всех исследуемых режимов. Наконец, общая удовлетворенность терапией, оцененная пациентками по 10-балльной шкале, была статистически значимо выше в группе С — 8,4±1,1 баллов против 7,2±1,5 и 7,6±1,3 баллов в группах А и В соответственно ($p < 0,001$), что отражает субъективное восприятие пациентками эффективности и переносимости различных режимов лечения. Таким образом, анализ отдаленных результатов подтверждает преимущество комбинации агонистов ГнРГ с ингибиторами ароматазы в отношении профилактики рецидивов эндометриоза и восстановления фертильности при приемлемом профиле безопасности и высокой субъективной удовлетворенности пациенток.

Заключение

Проведенное проспективное когортное исследование продемонстрировало статистически и клинически значимые преимущества комбинации агонистов ГнРГ с add-back терапией и ингибиторами ароматазы в лечении пациенток с распространенными формами эндометриоза. Максимальный терапевтический эффект данного режима наблюдался в отношении редукции хронической тазовой боли (снижение на 87,4 % через 6 месяцев терапии), что существенно превосходило результаты применения диеногеста с НПВС (65,7 %) и агонистов ГнРГ с НПВС (71,2 %). Применение ингибиторов ароматазы в сочетании с агонистами ГнРГ обеспечивало не только более выраженное купирование болевого синдрома, но и более устойчивый долгосрочный эффект с сохранением значимого преимущества через 24 месяца наблюдения. Редукция объема эндометриоидных кист достигала 74,6 % в группе комбинированной терапии с ингибиторами ароматазы против 41,7 % при применении диеногеста с НПВС и 59,1 % при использовании агонистов ГнРГ с НПВС. Частота полного исчезновения

эндометриом составила 45,2 % в группе агонистов ГнРГ с ингибиторами ароматазы, что значительно превышало результаты в группах сравнения (19,0 % и 27,1 %). Особенно значимыми оказались различия в отдаленных результатах лечения. Частота рецидивов через 24 месяца составила всего 8,0 % в группе комбинированной терапии с ингибиторами ароматазы против 25,0 % и 18,1 % в группах диеногеста с НПВС и агонистов ГнРГ с НПВС соответственно. Уровень СА-125 через 24 месяца после начала терапии сохранялся на уровне 40,4 % от исходного в группе агонистов ГнРГ с ингибиторами ароматазы, тогда как в группах сравнения данный показатель составлял 74,6 % и 63,8 %. Частота спонтанного наступления беременности достигала 32,4 % в группе комбинированной терапии с ингибиторами ароматазы, что существенно превышало результаты в других группах (18,6 % и 23,8 %), при сокращении времени до наступления беременности на 28,7 % и 17,3 % соответственно. Эффективность программ ВРТ также была выше в группе агонистов ГнРГ с ингибиторами ароматазы, составляя 39,2 % против 28,4 % и 31,6 % на перенос эмбрионов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zondervan K.T., Becker C.M., Missmer S.A. Endometriosis. N Engl J Med. 2020;382(13):1244–1256. DOI: 10.1056/NEJMra1810764
2. Vercellini P., Viganò P., Somigliana E., Fedele L. Endometriosis: pathogenesis and treatment. Nat Rev Endocrinol. 2014;10(5):261–275. DOI: 10.1038/nrendo.2013.255
3. Guo S.W. Recurrence of endometriosis and its control. Hum Reprod Update. 2009;15(4):441–461. DOI: 10.1093/humupd/dmp007
4. Miller J.E., Ahn S.H., Monsanto S.P., et al. Implications of immune dysfunction on endometriosis associated infertility. Oncotarget. 2017;8(4):7138–7147. DOI: 10.18632/oncotarget.12577
5. Bulun S.E., Monsivais D., Kakinuma T., et al. Molecular biology of endometriosis: from aromatase to genomic abnormalities. Semin Reprod Med. 2015;33(3):220–224. DOI: 10.1055/s-0035-1554053
6. Ferrero S., Remorgida V., Maganza C., et al. Aromatase and endometriosis: estrogens play a role. Ann NY Acad Sci. 2014; 1317:17–23. DOI: 10.1111/nyas.12411
7. Somigliana E., Viganò P., Barbara G., et al. Treatment of endometriosis-related pain: options and outcomes. Front Biosci (Elite Ed). 2017; 9:385–393. DOI: 10.2741/e806
8. Dunselman G.A., Vermeulen N., Becker C., et al. ESHRE guideline: management of women with endometriosis. Hum Reprod. 2014;29(3):400–412. DOI: 10.1093/humrep/det457
9. Rafique S., Decherney A.H. Medical management of endometriosis. Clin Obstet Gynecol. 2017;60(3):485–496. DOI: 10.1097/GRF.0000000000000292
10. Buggio L., Somigliana E., Barbara G., et al. Oral and depot progestin therapy for endometriosis: towards a personalized medicine. Expert Opin Pharmacother. 2017;18(15):1569–1581. DOI: 10.1080/14656566.2017.1381086
11. May K.E., Conduit-Hulbert S.A., Villar J., et al. Peripheral biomarkers of endometriosis: a systematic review. Hum Reprod Update. 2010;16(6):651–674. DOI: 10.1093/humupd/dmq009
12. Pavone M.E., Bulun S.E. Aromatase inhibitors for the treatment of endometriosis. Fertil Steril. 2012;98(6):1370–1379. DOI: 10.1016/j.fertnstert.2012.08.053
13. Ferrero S., Evangelisti G., Barra F. Current, and emerging treatment options for endometriosis. Expert Opin Pharmacother. 2018;19(10):1109–1125. DOI: 10.1080/14656566.2018.1494154
14. Taylor H.S., Giudice L.C., Lessey B.A., et al. Treatment of endometriosis-associated pain with elagolix, an oral GnRH antagonist. N Engl J Med. 2017;377(1):28–40. DOI: 10.1056/NEJMoa1700089
15. Leonardi M., Gibbons T., Armour M., et al. When to do surgery and when not to do surgery for endometriosis: a systematic review and meta-analysis. J Minim Invasive Gynecol. 2020;27(2):390–407.e3. DOI: 10.1016/j.jmig.2019.10.014

© Романовская Анна Викторовна (annavictorovna@mail.ru); Аржаева Инга Аркадьевна (arzhaeva@sgmu.ru);
 Паршин Алексей Владимирович (parshin_av64@mail.ru); Михайлова Анастасия Владимировна (mixailovaav@yandex.ru);
 Класов Алибек Мурзабекович (Alibekklassov1989@gmail.com); Немцева Лада Андреевна (Soul339@mail.ru)
 Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К НЕИНВАЗИВНОЙ ДИАГНОСТИКЕ ЭНДОМЕТРИОЗА: КОНСТРУИРОВАНИЕ И ОТБОР ФАКТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В КЛИНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

INNOVATIVE APPROACHES TO NON-INVASIVE ENDOMETRIOSIS DIAGNOSIS: CONSTRUCTION AND SELECTION OF FACTORS USING MACHINE LEARNING METHODS IN CLINICAL PRACTICE

A. Rusinova

Summary. Endometriosis is a widely prevalent pathological condition; however, its clinical manifestations and underlying mechanisms remain insufficiently studied. The time gap between the onset of the first symptoms and the establishment of a diagnosis can sometimes exceed ten years, significantly hindering early diagnosis and adequate treatment. Currently, there is no universal treatment capable of completely eradicating endometriosis, underscoring the necessity for developing new diagnostic approaches. This study examines the construction and selection of factors associated with the risk of developing endometriosis using modern machine learning techniques to formulate an optimal mathematical model. An analysis of the significance of selected features was conducted, allowing for the reduction of the factor set to those that do not degrade the dynamic characteristics of the model, including accuracy, responsiveness, and stability. As a result, a risk prediction algorithm for endometriosis based on logistic regression was developed, incorporating 30 significant features. The effectiveness of the developed model was evaluated using standard metrics such as accuracy, sensitivity, specificity, F1-score, and the area under the ROC curve. The best results were achieved with an AUC value of 0.950, indicating a high predictive ability of the model.

Keywords: endometriosis, non-invasive diagnostics, machine learning, forecasting, logistic regression.

Русинова Анастасия Константиновна

ФГБОУ ВО Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко
rusiknastya@mail.ru

Аннотация. Эндометриоз представляет собой широко распространенное патологическое состояние, однако его клиническое проявление и механизмы остаются недостаточно изученными. Временной разрыв между появлением первых симптомов и установлением диагноза иногда составляет более десяти лет, что значительно затрудняет раннюю диагностику и адекватное лечение. На сегодняшний день отсутствует универсальное лечение, способное полностью устранить эндометриоз, что подчеркивает необходимость разработки новых подходов к диагностике. В данном исследовании рассматривается конструирование и отбор факторов, ассоциированных с риском развития эндометриоза, с использованием современных методов машинного обучения для формирования оптимальной математической модели. Проведен анализ значимости выбранных признаков, что позволило сократить набор факторов до тех, которые не ухудшают динамические характеристики модели, включая точность, быстродействие и стабильность. В результате был создан алгоритм прогнозирования риска эндометриоза на основе логистической регрессии, который включает 30 значимых признаков. Эффективность разработанной модели была оценена с помощью стандартных метрик, таких как точность, чувствительность, специфичность, F1-score и площадь под ROC-кривой. Наилучшие результаты достигнуты с показателем AUC, равным 0,950, что свидетельствует о высокой прогностической способности модели.

Ключевые слова: эндометриоз, неинвазивная диагностика, машинное обучение, прогнозирование, логистическая регрессия.

Введение

Одной из значительных проблем, связанных с диагностикой эндометриоза, является разнообразие его клинических проявлений. Это разнообразие приводит к тому, что от появления первых симптомов до окончательного подтверждения диагноза, которое происходит только после гистологического анализа, может пройти около десяти лет. Важно отметить, что в современных клинических рекомендациях отсутствует эффективный неинвазивный метод для подтверждения

диагноза эндометриоза. Данная патология по-прежнему представляет собой серьезную и недостаточно изученную проблему общественного здравоохранения [1]. По статистическим данным, эндометриоз поражает примерно 10 % женщин репродуктивного возраста и затрагивает около 20–25 % женщин, перенесших операции по поводу бесплодия или тазовой боли [2, 3]. Симптомы данного заболевания существенно ухудшают качество жизни многих женщин, что делает проблему особенно актуальной [4–6, 8].

Симптоматическое лечение эндометриоза варьируется от консервативных методов, таких как занятия йогой и прием комбинированных оральных контрацептивов, до более радикальных хирургических вмешательств, таких как резекция яичника и цистэктомия [7]. Однако, эффективных препаратов для лечения эндометриоза на сегодняшний день не существует. Таким образом, перед медицинским сообществом стоит задача совершенствования методов диагностики эндометриоза с целью сокращения времени, необходимого для установления точного диагноза [9]. Это позволит своевременно начать симптоматическое лечение и предотвратить дальнейшее прогрессирование заболевания, что, в свою очередь, может значительно улучшить качество жизни пациенток и повысить шанс на зачатие.

Современные информационные технологии и методы машинного обучения предоставляют новые возможности для решения данной задачи. Их интеграция с клиническими и экспериментальными методами позволяет разработать математическую модель, которая будет прогнозировать риск развития эндометриоза на основе анкетного опроса пациенток. Важно отметить, что создание такой модели включает в себя ключевой этап — построение и отбор признаков, определяющих качественные характеристики диагностики и предсказательной способности модели. Это может стать основой для более ранней и точной диагностики эндометриоза, что несомненно окажет положительное влияние на их качество жизни.

Материалы и методы

В целях оценки риска возникновения и раннего прогнозирования эндометриоза среди женщин разрабаты-

вается прогностическая модель, основанная на анализе клинических признаков, полученных из стандартизованного опросника. Данный опросник был адаптирован в соответствии с актуальными руководящими принципами в области акушерства и гинекологии. Использование современных алгоритмов машинного обучения для обработки многомерных данных позволяет эффективно идентифицировать наборы признаков, характеризующие различные классы заболеваний, что усиливает теоретическую и практическую значимость проекта.

Прогностические модели разрабатываются в рамках обучения с учителем, где выявляются закономерности, служащие прогностическими маркерами для оценки риска эндометриоза, его прогрессирования и рецидивов. Классические метки для обучения модели включают данные, полученные из гистологических исследований, а также ответов респондентов, обозначающих свое состояние как практически здоровое.

Процесс машинного обучения, описанный в исследовании, охватывает этапы построения и отбора признаков, которые играют ключевую роль в диагностике эндометриоза. Как показывает ряд исследований, количество таких признаков может достигать 200, что подчеркивает важность правильного их формирования. Построение признаков влияет на производительность прогностических моделей, и без тщательной проработки этого этапа невозможно осуществить последующий отбор признаков, что также критически важно для достижения высоких показателей точности и эффективности машинного обучения.

В практическом плане процесс построения признаков является многоступенчатым и включает реше-

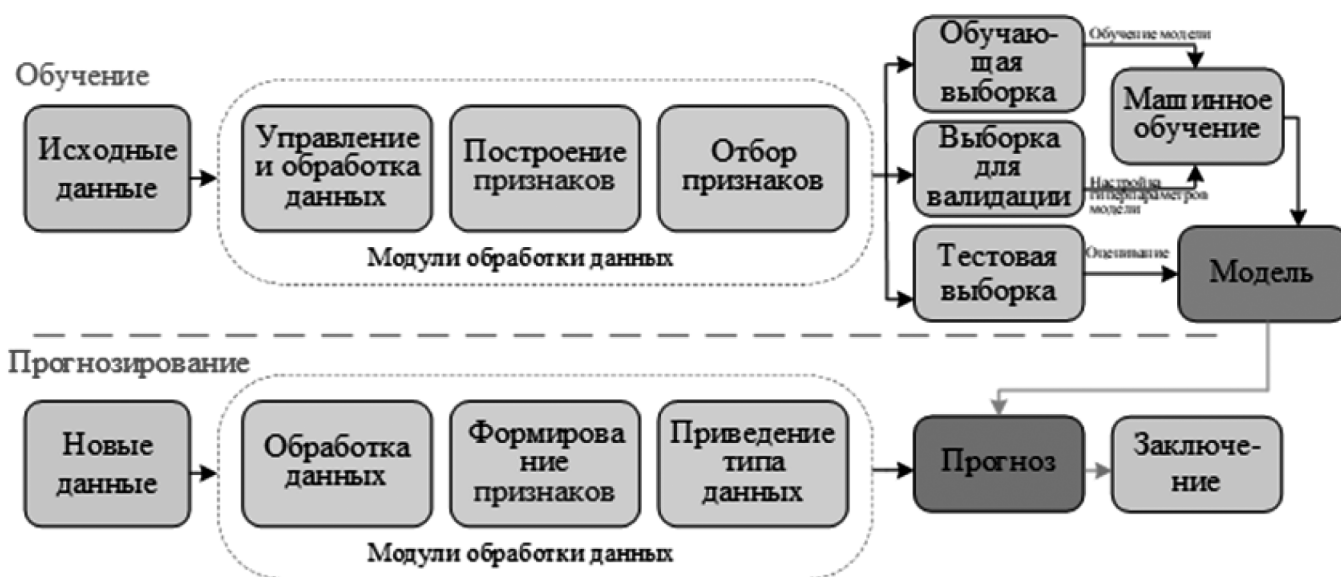


Рис.1. Процесс машинного обучения, используемый при разработке и обучении модели оценки риска при неинвазивной диагностике эндометриоза

ние задач, таких как обработка пропущенных данных, обнаружение выбросов, а также применение методов кодирования и масштабирования данных. Это может включать, например, использование метода One-hot encoding для кодирования категориальных переменных и нормализацию для унификации диапазонов числовых данных. Также на данный процесс оказывают влияние параметры, такие как структура и объем данных, доступные вычислительные ресурсы, а также специфика предметной области.

Методы отбора признаков формируют подмножество исходных данных, которые используются для обучения модели. При этом могут применяться методы фильтрации, оберточные и встроенные методы. Методы фильтрации, такие как критерий хи-квадрат и критерий Фишера, позволяют оценивать значимость и взаимосвязь между переменными. Оберточные методы, например, позволяют оптимизировать отбор, анализируя важность признаков, а встроенные методы, такие как Lasso-регуляризация, помогают одновременно выполнять выбор признаков и обучение модели.

В рамках исследования также была разработана анкета для медико-социологического опроса, включающая около шестидесяти признаков, ассоциированных с эндометриозом, многие из которых были подробно обсуждены в научной литературе [9–11]. Ключевое внимание уделено формализации болевых симптомов, которые являются субъективными и зависят от множества факторов, включая характер патологии, психологическое состояние и жизненный опыт пациентки.

Для оценки болевых симптомов в анкете применяются различные шкалы, такие как Лидсская шкала оценки нейропатических симптомов (LANSS) и опросник DN4. Визуальная аналоговая шкала применяется для определения интенсивности боли, позволяя пациенткам обозначать уровень своего discomfort на 10-сантиметровой линии. Многомерные оценки болевых симптомов могут быть также проведены с использованием опросника Мак-Гилла [12].

Данная анкета предполагает, что участницы медико-социологического опроса будут отвечать на вопросы о наличии тех или иных симптомов в течение последнего месяца. В исследовании задействованы современные методы машинного обучения, включая линейную, множественную и логистическую регрессию, а также деревья решений, что призвано повысить точность и надежность прогнозирующих моделей в контексте диагностики эндометриоза.

Результаты и их обсуждение

В целях прогнозирования вероятности развития эндометриоза была создана обучающая выборка данных,

включающая две группы пациентов. Первая группа составлена из пациентов, у которых установлен диагноз эндометриоз, основанный на результатах предыдущего лечения или клинических обследований, подтверждающих наличие глубокого эндометриоза. Вторая, контрольная группа, включает пациентов с одним симптомом, указывающим на возможность эндометриоза, однако без предварительного лечения или клинических исследований, подтверждающих диагноз глубокого эндометриоза. Обучающая выборка данных включает три типа данных: числовые, категориальные и текстовые.

Формирование выборки позволило оценить генеральную совокупность по таким параметрам, как пол, возраст и предрасположенность к эндометриозу. Выборка состоит из женщин в возрасте от 18 до 45 лет (со средним возрастом 28 ± 9 лет), при этом объем выборочной совокупности в 393 пациента обеспечивает репрезентативность с точностью 95 % и погрешностью ± 5 %. Все участники исследования подписали информированное согласие.

Медико-социологический опрос завершили 393 респондента, из которых 202 имели диагностированный эндометриоз, а 191 считали себя здоровыми, не проходя диагностические исследования. Учитывается вероятность, что часть недиагностированных женщин может страдать от эндометриоза, что потенциально влияет на разработанную модель, в результате чего они могут попасть в группу ложноотрицательных результатов. Однако, учитывая, что распространенность эндометриоза в популяции оценивается в пределах 5–10 %, предполагается, что такое смещение будет относительно незначительным.

На основании описательной статистики и значимости признаков, полученных с применением методов машинного обучения, был проанализирован вклад каждого признака в способность модели корректно классифицировать ответы респондентов, а также исследована корреляция между признаками. Высокая корреляция может сигнализировать о избыточности признака, что было визуализировано на тепловой карте корреляции между каждой парой значений признаков, где отсутствие одноцветных строк и столбцов указывает на коррелирование отобранных признаков между собой.

В процессе формирования обучающей выборки отбор признаков был осуществлен с применением селектора голосования, в который интегрированы три метода: метод фильтрации, основанный на корреляции Пирсона; метод обучения без учителя, использующий мультиколлинеарность; и метод рекурсивного исключения признаков. Селекция признаков проводилась следующим образом: результаты каждого из трех методов фиксировались в формате бинарных значений, где 1 указывало на необходимость сохранения признака, а 0 — на его ис-

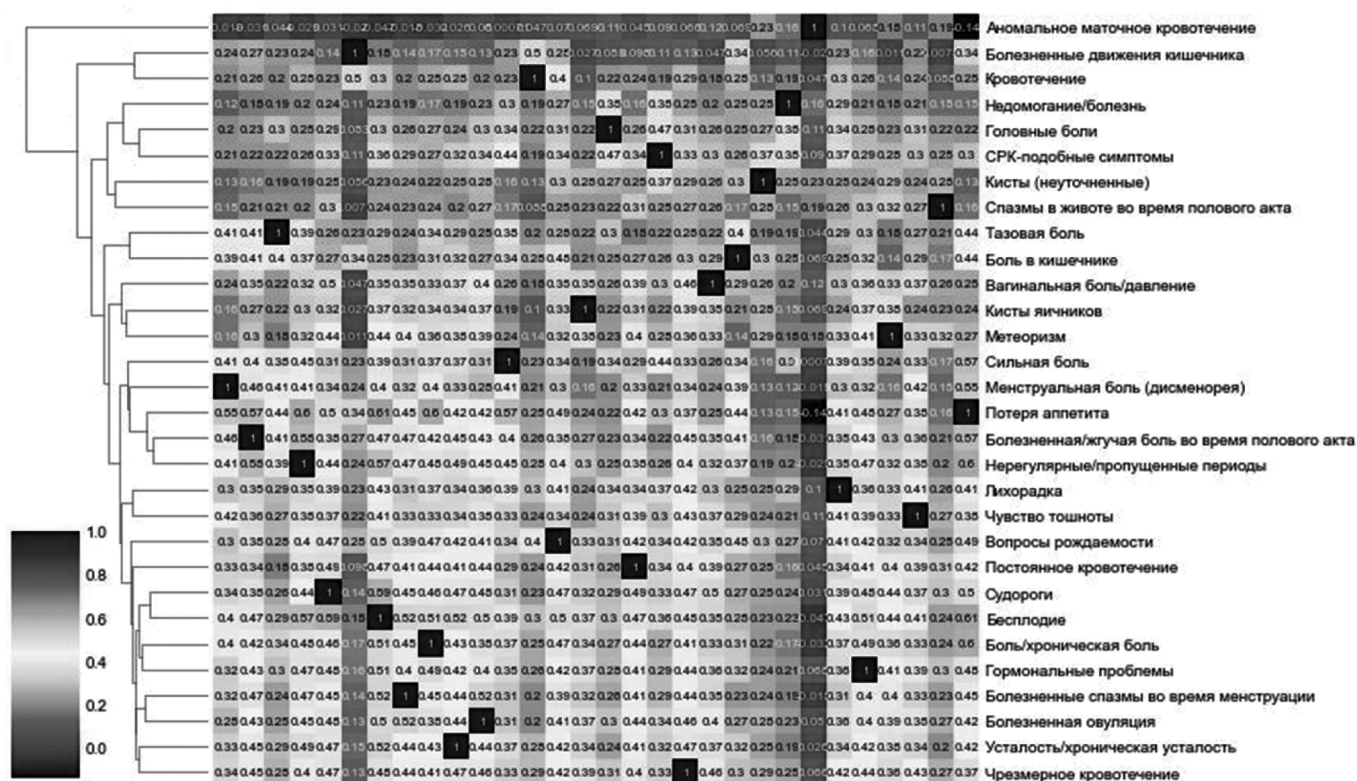


Рис. 2. Тепловая карта корреляции признаков эндометриоза, сгруппированных с помощью метода кластеризации

ключение. Затем вычислялось среднее значение голосов по каждому признаку. Если среднее значение превышало установленные 0,5, что означало, что два из трех методов поддерживали сохранение признака, он оставлялся в наборе. В результате был сформирован подмножество из 30 признаков, обеспечивающих оптимальные характеристики производительности модели машинного обучения. Для подтверждения необходимости исключения каких-либо дополнительных признаков проводился итеративный процесс удаления каждого признака с последующим переобучением и тестированием модели, где во всех случаях показатели производительности демонстрировали ухудшение.

Среди отобранных признаков, входящих в наиболее производительную модель, представленных в порядке убывания важности, были такие, как тяжелое или сильное менструальное кровотечение, нерегулярные или пропущенные менструации, аномальное маточное кровотечение, менструальная боль (дисменорея), болезненные ощущения при движении кишечника, боль в кишечнике, тазовая боль, симптомы, напоминающие синдром раздраженного кишечника, болезненные спазмы во время менструации и другие. На основе выбранных признаков была разработана модель логистической регрессии с использованием методов машинного обучения.

Endometriosis
0 191
1 202

```
dtype: int64
Менструальная боль (дисменорея) ... Endometriosis
1 1 ... 1
1 1 ... 1
0 1 ... 1
1 0 ... 1
0 1 ... 1
[5 rows x 31 columns]
Точность DecisionTreeClassifier: 0.8764044943820225
Матрица ошибок
[[72 13]
 [ 9 84]]
precision recall f1-score support
0 0.89 0.85 0.87 85
1 0.87 0.90 0.88 93
accuracy 0.88 178
macro avg 0.88 0.88 0.88 178
weighted avg 0.88 0.88 0.88 178

-----
Среднее абсолютное отклонение:
0.12359550561797752
Среднеквадратичная ошибка: 0.12359550561797752
Корень из среднеквадратичной ошибки:
0.3515615246553262

-----
Коэффициенты регрессии: [-3.49543333] [[1.45885081
0.76242693 0.92791622 1.23194836 0.70039648 1.460676
1.15791625 1.13007877 0.60017117 1.71682529
-0.91069957 0.79625285
```


1.60343103 -0.85365601 1.66803964 -0.35314205
 -1.65131403 1.4674266
 0.07601714 -0.30986979 -1.32778715 1.03996341
 -1.07582961 -1.54173294
 -1.53315974 0.75692754 0.70849066 -0.47969551
 0.54825219 -1.10146085]]

Точность LogisticRegression: 0.9504504504504504

Важность: 0, Score: 1.45885

Важность: 1, Score: 0.76243

Важность: 2, Score: 0.92792

Важность: 3, Score: 1.23195

Важность: 4, Score: 0.70040

Важность: 5, Score: 1.46068

Важность: 6, Score: 1.15792

Важность: 7, Score: 1.13008

Важность: 8, Score: 0.60017

Важность: 9, Score: 1.71683

Важность: 10, Score: -0.91070

Важность: 11, Score: 0.79625

Важность: 12, Score: 1.60343

Важность: 13, Score: -0.85366

Важность: 14, Score: 1.66804

Важность: 15, Score: -0.35314

Важность: 16, Score: -1.65131

Важность: 17, Score: 1.46743

Важность: 18, Score: 0.07602

Важность: 19, Score: -0.30987

Важность: 20, Score: -1.32779

Важность: 21, Score: 1.03996

Важность: 22, Score: -1.07583

Важность: 23, Score: -1.54173

Важность: 24, Score: -1.53316

Важность: 25, Score: 0.75693

Важность: 26, Score: 0.70849

Важность: 27, Score: -0.47970

Важность: 28, Score: 0.54825

Важность: 29, Score: -1.10146

Эффективность разработанной модели была оценена с применением общепринятых метрик в области машинного обучения, таких как точность, чувствительность, специфичность, точность, F1-score и площадь под ROC-кривой [13].

Для повышения значимости полученных результатов была проведена процедура перекрестной проверки. Хотя множество моделей продемонстрировало высокие показатели производительности, модель логистической регрессии оказалась наиболее эффективной, достигнув значения AUC, равного 0,95.

Данные, полученные от респондентов с подтвержденным диагнозом «эндометриоз», стали основой для разработки прогностической модели раннего выявления эндометриоза у женщин, основанной на признаках, с использованием различных методов машинного об-

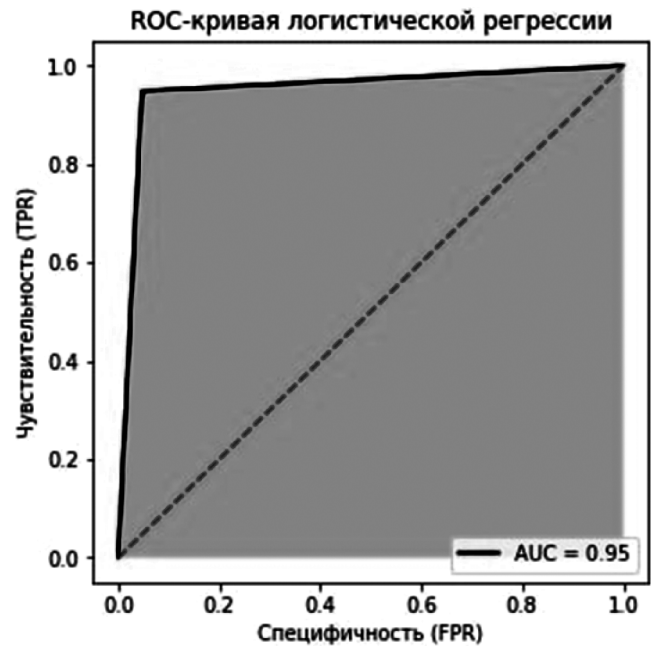


Рис. 3. ROC-кривая модели логистической регрессии для прогнозирования риска развития эндометриоза

учения. На основе многомерных данных, подвергнутых анализу с помощью алгоритмов машинного обучения, был выделен оптимальный набор признаков, эффективно характеризующий разнообразные состояния и позволяющий идентифицировать классы заболеваний. В ходе применения методов машинного обучения были определены закономерности, обладающие прогностическим значением, что дало возможность оценить риск заболевания, его прогрессирования и рецидива. Достоверность созданной прогностической модели была проверена путем сопоставления с гистопатологическими данными, использовавшимися в качестве меток класса в процессе машинного обучения.

Кроме формирования прогнозов и генерации заключений, указанные модели также демонстрируют значимость каждого признака, что позволяет выявлять и исключать неинформативные признаки из будущих медико-социологических опросов.

Следует подчеркнуть, что в обучающую выборку не были включены данные о социально-демографическом статусе респондентов, такие как возраст, образование, статус в браке, место проживания, индекс массы тела, результаты физического обследования и наличие сопутствующих заболеваний, что означает, что в разрабатываемых моделях эти переменные не учитывались.

Заключение

В рамках исследования была решена задача построения и отбора признаков для оценки состояния пациентов с подтвержденным диагнозом эндометриоз. В про-

цессе работы был применен селектор, использующий несколько методов анализа важности признаков, что позволило получить наиболее эффективную модель на основе подмножества из тридцати признаков.

Разработанная модель прогнозирования эндометриоза основана на данных, полученных от респондентов посредством заполнения анкеты, отражающей самооценки их состояния здоровья. Модель логистической регрессии продемонстрировала наилучшие результаты, достигнув значений AUC=0.95, точности и F1-score=0.94, а также чувствительности=0.93 и специфичности=0.95.

На основании полученных результатов показана целесообразность применения методов машинного обучения для формирования прогностических моделей, оценивающих риск развития эндометриоза у женщин, и обозначена возможность создания рекомендательного блока, основывающегося на этих моделях, в рамках подсистемы неинвазивной диагностики. Разработанная

модель может быть использована женщинами, испытывающими симптомы, на начальных этапах их диагностического обследования для оценки вероятности того, что их симптомы могут быть вызваны эндометриозом.

В результате создания и отбора признаков была сформирована модель машинного обучения, способная прогнозировать эндометриоз с высокой точностью, достигающей 95 %, основываясь на подмножестве из тридцати самооценочных симптомов. Ожидается, что данная модель значительно сократит время, необходимое для постановки диагноза, которое в настоящее время составляет от 6 до 10 лет с момента появления симптомов [14]. Более того, модель реализована в виде веб-приложения, позволяющего женщинам провести самодиагностику и получить оценки вероятности наличия эндометриоза. Одной из рекомендаций, предоставляемых данным приложением, является направление женщин на диагностическое обследование на наличие эндометриоза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Benagiano G., Brosens I., Lippi D. The history of endometriosis. *Gynecol Obstet Invest.* 2014, 78: 1–9.
2. Wheeler J.M. Epidemiology of endometriosis-associated infertility. *J Reprod Med.* 1989, 34: 41–6.
3. Eskenazi B., Warner M.L. Epidemiology of endometriosis. *Obstet Gynecol Clin North Am.* 1997, 24: 235–58.
4. Nnoaham K.E., Hummelshoj L., Webster P., et al. Impact of endometriosis on quality of life and work productivity: a multicenter study across ten countries. *Fertility Sterility.* 2011, 96(2): 366–73. e8.
5. Dunselman G.A.J., Vermeulen N., Becker C., et al. ESHRE guideline: management of women with endometriosis. *Human Reproduction.* 2014, 29: 400–12.
6. Andres M.P., Borrelli, G.M., Abrão, M.S. Endometriosis classification according to pain symptoms: can the ASRM classification be improved? *Best Practice & Research Clinical Obstetrics & Gynaecology.* 2018, 51: 111–118.
7. Koga K., Takamura M., Fujii T, Osuga Y. Prevention of the recurrence of symptom and lesions after conservative surgery for endometriosis. *Fertility Sterility.* 2015, 104: 793–801.
8. Johnson N.P., Hummelshoj L., Adamson G.D., et al. World endometriosis society consensus on the classification of endometriosis. *Human Reproduction.* 2017, 32: 315–24.
9. Fauconnier A. et al. Early identification of women with endometriosis by means of a simple patient-completed questionnaire screening tool: A diagnostic study. *Fertility Sterility.* 2021, 116: 1580–1589.
10. Eskenazi B. et al. Validation study of nonsurgical diagnosis of endometriosis. *Fertility Sterility.* 2001, 76: 929–935.
11. Chapron C. et al. A new validated screening method for endometriosis diagnosis based on patient questionnaires. *eClinicalMedicine.* 2022, 44: 101263.
12. Абрамович С.Г. Физиотерапия боли: учеб. пособие / С.Г. Абрамович Иркутск: РИО ИГМАПО. 2020, 72.
13. Лимановская О.В. Основы машинного обучения: учебное пособие / О.В. Лимановская, Т.И. Алферьева; Мин-во науки и высш. образования РФ. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2020, 88.
14. Линде В.А. Эндометриозы. Патогенез, клиническая картина, диагностика и лечение / Линде В.А., Татарова Н.А. — М.: ГЭОТАР-Медиа. 2010, 192.

© Русинова Анастасия Константиновна (rusiknastyia@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ У БЕРЕМЕННЫХ: ДИАГНОСТИКА И ТАКТИКА ВЕДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЖЕНСКОЙ КОНСУЛЬТАЦИИ

CARDIOVASCULAR DISEASES IN PREGNANT WOMEN: DIAGNOSIS AND MANAGEMENT TACTICS IN ANTENATAL CLINIC SETTINGS

**A. Ryaboshapko
M. Balashova
D. Daudova
A. Chubanova
Z. Abdurakhmanova
A. Klassov**

Summary. Introduction. Cardiovascular diseases (CVD) in pregnant women represent a serious medical and social problem, negatively affecting both the mother and fetal development. Physiological changes during pregnancy increase the load on the cardiovascular system, which can lead to the manifestation of hidden pathology or worsening of existing diseases.

Objective. To determine the frequency, structure, and risk factors of cardiovascular diseases in pregnant women, to evaluate the effectiveness of diagnosis and management tactics for this category of patients in antenatal clinic settings. *Materials and methods.* The study was conducted at an antenatal clinic in Saratov. 140 pregnant women in the I-III trimesters, aged 18 to 36 years, were examined. A comprehensive examination included clinical, laboratory, and instrumental research methods.

Results. Various cardiovascular disorders were detected in 72.1 % of pregnant women, the frequency of which increased with the progression of pregnancy. The most common were arterial hypertension (26.7 %), cardiac arrhythmias (24.3 %), and anemia (39.6 %). A relationship was established between the presence of extragenital pathology and the frequency of cardiovascular complications. An algorithm for monitoring and treating pregnant women with CVD in outpatient settings was developed.

Conclusion. Cardiovascular diseases are widespread among pregnant women and require a multidisciplinary approach to diagnosis and treatment. Timely identification of risk factors, early diagnosis, and adequate therapy of cardiovascular disorders significantly reduce the risk of pregnancy complications and improve perinatal outcomes.

Keywords: pregnancy, cardiovascular diseases, arterial hypertension, cardiac arrhythmias, antenatal clinic, outpatient management.

Рябошапко Алевтина Ивановна

Кандидат медицинских наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский
университет имени В.И. Разумовского»
alla.ryaboshapko@yandex.ru

Балашова Марина Евгеньевна

Кандидат медицинских наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский
университет имени В.И. Разумовского»
mbalashova13@mail.ru

Даудова Диана Асланбековна

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский
университет имени В.И. Разумовского»
ddaudova99@mail.ru

Чубанова Алима Фейтулаховна

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский
университет имени В.И. Разумовского»
alima.rashidova2000@list.ru

Абдурахманова Зульмира Абдурахмановна

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский
университет имени В.И. Разумовского»
zulmira_2002_dmt@yahoo.com

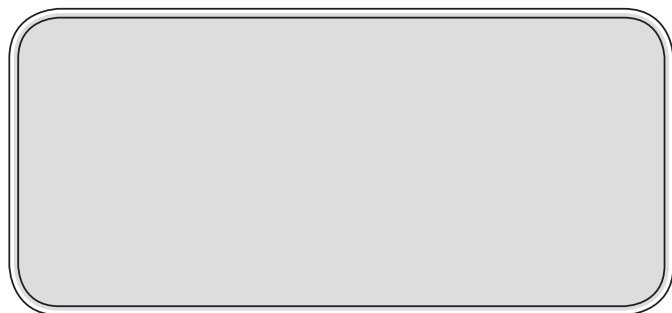
Классов Алибек Мурзабекович

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский
университет имени В.И. Разумовского»
Alibekklassov1989@gmail.com

Аннотация. Введение. Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) у беременных представляют серьезную медико-социальную проблему, оказывая негативное влияние как на организм матери, так и на развитие плода. Физиологические изменения во время беременности увеличивают нагрузку на сердечно-сосудистую систему, что может приводить к манифестации скрытой патологии или ухудшению течения имеющихся заболеваний. Цель. Определить частоту, структуру и факторы риска сердечно-сосудистых заболеваний у беременных, оценить эффективность диагностики и тактики ведения данной категории пациенток в условиях женской консультации.

Материалы и методы. Исследование проводилось на базе женской консультации г. Саратова. Были обследованы 140 беременных женщин I–III триместра в возрасте от 18 до 36 лет. Комплексное обследование включало клинические, лабораторные и инструментальные методы исследования.

Результаты. У 72,1 % беременных были выявлены различные сердечно-сосудистые нарушения, частота которых увеличивалась с прогрессированием беременности. Наиболее распространенными были артериальная гипертензия (26,7 %), нарушения ритма сердца (24,3 %) и анемия (39,6 %). Установлена взаимосвязь между наличием экстрагенитальной патологии и частотой развития сердечно-сосудистых осложнений. Разработан алгоритм наблюдения и лечения беременных с ССЗ в амбулаторных условиях.



Введение

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) остаются одной из ведущих причин материнской заболеваемости и смертности во всем мире [1; 2]. По данным мировой статистики, частота ССЗ у беременных составляет от 1 до 4 % и имеет тенденцию к увеличению, что связано с современными демографическими изменениями: увеличением возраста беременных, ростом распространенности ожирения, артериальной гипертензии, сахарного диабета и других метаболических нарушений [2; 3, с. 189].

Физиологические изменения гемодинамики во время беременности характеризуются увеличением объема циркулирующей крови на 30–50 %, сердечного выброса на 30–40 %, частоты сердечных сокращений на 10–20 уд/мин, снижением общего периферического сосудистого сопротивления [3, с. 258; 4, с. 71]. Эти адаптационные процессы создают дополнительную нагрузку на сердечно-сосудистую систему, что может привести к декомпенсации скрытой патологии и манифестации ССЗ [4, с. 70; 5, с. 12].

Спектр сердечно-сосудистой патологии у беременных достаточно широк и включает артериальную гипертензию (хроническую и гестационную), нарушения ритма и проводимости сердца, заболевания миокарда, пороки сердца, тромбоэмболические осложнения [5, с. 10; 6, с. 44]. Кроме того, сама беременность может сопровождаться патологическими состояниями, оказывающими неблагоприятное влияние на сердечно-сосудистую систему, например, анемией, которая встречается у 30–40 % беременных [6, с. 43].

Особую значимость имеет ранняя диагностика и своевременное лечение ССЗ у беременных в амбулаторно-поликлинических условиях, в частности, в женских консультациях, где наблюдается большинство беременных [7, с. 520]. Однако выбор диагностических методов и лекарственных препаратов для лечения ССЗ у беременных ограничен в связи с потенциальной опасностью для плода [7, с. 514; 8, с. 169].

Заключение. Сердечно-сосудистые заболевания широко распространены среди беременных женщин и требуют мультидисциплинарного подхода к диагностике и лечению. Своевременное выявление факторов риска, ранняя диагностика и адекватная терапия сердечно-сосудистых нарушений существенно снижают риск осложнений беременности и улучшают перинатальные исходы.

Ключевые слова: беременность, сердечно-сосудистые заболевания, артериальная гипертензия, нарушения ритма сердца, женская консультация, амбулаторное ведение.

В настоящее время отсутствуют единые подходы к ведению беременных с ССЗ в амбулаторных условиях, что обуславливает актуальность изучения структуры сердечно-сосудистой патологии у беременных, выявления факторов риска и разработки алгоритмов диагностики и лечения данной категории пациенток.

Цель исследования

Определить частоту, структуру и факторы риска сердечно-сосудистых заболеваний у беременных, оценить эффективность диагностики и тактики ведения данной категории пациенток в условиях женской консультации.

Материалы и методы

Исследование проводилось в течение 2022–2023 гг. на базе женской консультации, входящей в состав территориальной поликлиники г. Саратова. В районе обслуживания находится 32540 женщин, из которых 53,2 % фертильного возраста. На учет состояло 412 беременных женщин, причем 96,3 % из них встали на учет до 12 недель беременности.

Для проведения исследования была сформирована выборка из 140 беременных женщин I–III триместра в возрасте от 18 до 36 лет (средний возраст $27,4 \pm 4,2$ года). Первородных было 98 человек (70,0 %), повторнородных — 42 (30,0 %). Критериями включения в исследование были: возраст старше 18 лет, одноплодная беременность, наблюдение в женской консультации с I триместра, информированное согласие на участие в исследовании. Критериями исключения являлись: многоплодная беременность, тяжелая экстрагенитальная патология, требующая госпитализации, онкологические заболевания, психические расстройства, отказ от участия в исследовании. Всем беременным проводилось комплексное обследование, включающее:

1. Сбор анамнеза (в т.ч. семейного, акушерского, сопутствующих заболеваний)
2. Физикальное обследование с измерением антропометрических показателей, артериального давления по стандартной методике
3. Лабораторные исследования: общий анализ крови, биохимический анализ крови (глюкоза, общий

белок, креатинин, мочевина, АЛТ, АСТ, билирубин), липидный профиль, коагулограмма, определение уровня электролитов (К, Na, Са, Mg), гормонов щитовидной железы (ТТГ, Т4 свободный)

4. Инструментальные исследования: ЭКГ в 12 отведениях (при первичном обращении и в динамике), эхокардиография (по показаниям), суточное мониторирование ЭКГ и артериального давления (по показаниям), УЗИ щитовидной железы

Все беременные были осмотрены терапевтом женской консультации, кардиологом, при необходимости — эндокринологом и другими специалистами.

В зависимости от срока беременности женщины были разделены на три группы:

- I группа — I триместр (до 12 недель) — 42 женщины
- II группа — II триместр (13–27 недель) — 54 женщины
- III группа — III триместр (28–40 недель) — 44 женщины

Для оценки факторов риска ССЗ у беременных был проведен анализ анамнестических данных, включая семейный анамнез, наличие вредных привычек, сопутствующих заболеваний, индекса массы тела до беременности.

Статистическая обработка результатов исследования проводилась с использованием программы Statistica 10.0. Количественные данные представлены в виде среднего значения и стандартного отклонения ($M \pm SD$) при нормальном распределении или медианы и межквартильного интервала (Me [Q25; Q75]) при распределении, отличном от нормального. Качественные данные представлены в виде абсолютных чисел и процентов. Для сравнения количественных показателей использовались t-критерий Стьюдента или U-критерий Манна-Уитни, для сравнения качественных показателей — критерий χ^2 . Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

В результате проведенного исследования у 101 беременной (72,1 %) были выявлены различные сердечно-сосудистые нарушения. При анализе частоты ССЗ в зависимости от срока беременности было установлено, что в I триместре ССЗ встречались у 22 женщин (52,4 %), во II триместре — у 39 (72,2 %), в III триместре — у 40 (90,9 %). Таким образом, отмечалось статистически значимое увеличение частоты ССЗ с увеличением срока гестации ($p < 0,001$).

Структура ССЗ у обследованных беременных представлена в таблице 1.

Таблица 1.

Структура сердечно-сосудистых заболеваний у беременных женщин

Нозология	Абс. число	% от общего числа обследованных (n=140)	% от числа беременных с ССЗ (n=101)
Артериальная гипертензия	37	26,4	36,6
— Хроническая артериальная гипертензия	18	12,9	17,8
— Гестационная артериальная гипертензия	19	13,6	18,8
Нарушения ритма сердца	34	24,3	33,7
— Синусовая тахикардия	19	13,6	18,8
— Желудочковая экстрасистолия	9	6,4	8,9
— Суправентрикулярная экстрасистолия	4	2,9	4,0
— Пароксизмальная наджелудочковая тахикардия	2	1,4	2,0
Нарушения проводимости	6	4,3	5,9
— Неполная блокада правой ножки пучка Гиса	3	2,1	3,0
— АВ-блокада I степени	2	1,4	2,0
— Синдром ранней реполяризации желудочков	1	0,7	1,0
Пролапс митрального клапана	5	3,6	5,0
Анемия	55	39,3	54,5
— Легкой степени (Hb 90–110 г/л)	38	27,1	37,6
— Средней степени (Hb 70–89 г/л)	17	12,1	16,8

Как видно из таблицы 1, наиболее часто у беременных встречались анемия (39,3 %), артериальная гипертензия (26,4 %) и нарушения ритма сердца (24,3 %). Среди нарушений ритма сердца преобладала синусовая тахикардия (13,6 % от общего числа обследованных) и желудочковая экстрасистолия (6,4 %). Тяжелых, жизнеугрожающих аритмий у наблюдаемых нами беременных выявлено не было. При анализе факторов риска развития ССЗ у беременных (таблица 2) было установлено, что наиболее значимыми являются: возраст старше 30 лет, избыточная масса тела или ожирение, отягощенный семейный анамнез по ССЗ, курение, наличие сопутствующих заболеваний (сахарный диабет, заболевания щитовидной железы, хронические заболевания почек).

Таблица 2.

Факторы риска сердечно-сосудистых заболеваний у беременных

Фактор риска	Беременные с ССЗ (n=101)	Беременные без ССЗ (n=39)	p
Возраст >30 лет, n (%)	43 (42,6 %)	8 (20,5 %)	0,013
ИМТ >25 кг/м ² до беременности, n (%)	39 (38,6 %)	7 (17,9 %)	0,018
Отягощенный семейный анамнез по ССЗ, n (%)	58 (57,4 %)	11 (28,2 %)	0,002
Курение до беременности, n (%)	24 (23,8 %)	4 (10,3 %)	0,071
Курение во время беременности, n (%)	8 (7,9 %)	1 (2,6 %)	0,240
Сахарный диабет (включая гестационный), n (%)	12 (11,9 %)	2 (5,1 %)	0,224
Заболевания щитовидной железы, n (%)	18 (17,8 %)	3 (7,7 %)	0,130
Хронические заболевания почек, n (%)	15 (14,9 %)	2 (5,1 %)	0,108
Многоплодная беременность в анамнезе, n (%)	19 (18,8 %)	4 (10,3 %)	0,205
Преэклампсия в анамнезе, n (%)	7 (6,9 %)	1 (2,6 %)	0,313

Из таблицы 2 видно, что среди беременных с ССЗ статистически значимо чаще встречались женщины старше 30 лет ($p=0,013$), имеющие избыточную массу тела или ожирение ($p=0,018$) и отягощенный семейный анамнез по ССЗ ($p=0,002$).

Особый интерес представляет изучение динамики изменений показателей гемодинамики у беременных в различные триместры (таблица 3).

Как видно из таблицы 3, по мере прогрессирования беременности отмечалось статистически значимое увеличение частоты сердечных сокращений ($p < 0,001$). Артериальное давление имело тенденцию к снижению во II триместре с последующим повышением в III триместре. Показатели гемоглобина и гематокрита снижались на протяжении всей беременности, что отражает физиологическую гемодилюцию, но также может свидетельствовать о развитии анемии беременных. При выявлении ССЗ у беременных проводилось комплексное лечение, включающее немедикаментозные методы (модификация образа жизни, рациональное питание, дозированные физические нагрузки, нормализация режима труда и отдыха) и при необходимости — медикаментоз-

Таблица 3.

Динамика показателей гемодинамики у беременных в различные триместры

Показатель	I триместр (n=42)	II триместр (n=54)	III триместр (n=44)	p
ЧСС, уд/мин	78,4±6,8	86,2±7,5	92,3±8,2	<0,001
САД, мм рт.ст.	115,6±12,3	113,4±11,8	121,7±14,5	0,004
ДАД, мм рт.ст.	72,3±8,5	70,1±7,9	78,4±9,7	<0,001
Гемоглобин, г/л	118,5±10,2	110,7±11,6	106,3±12,4	<0,001
Гематокрит, %	36,2±3,4	33,8±3,7	32,5±3,9	<0,001

ЧСС — частота сердечных сокращений, САД — систолическое артериальное давление, ДАД — диастолическое артериальное давление

ную терапию с использованием препаратов, разрешенных к применению во время беременности.

Лечение артериальной гипертензии у беременных включало:

1. Немедикаментозные методы: ограничение потребления соли до 5–6 г/сут, отказ от вредных привычек, соблюдение режима труда и отдыха, дозированные физические нагрузки
2. Медикаментозную терапию (по показаниям): метилдопа в дозе 500–2000 мг/сут, нифедипин пролонгированного действия 30–90 мг/сут, метопролол 25–100 мг/сут, лабеталол 100–800 мг/сут

Коррекция нарушений ритма сердца проводилась с учетом характера аритмии, наличия структурных изменений сердца и клинической симптоматики:

1. При функциональных аритмиях без органического поражения сердца рекомендовалось избегать провоцирующих факторов (стресс, кофеин, алкоголь), при необходимости назначались седативные препараты (пустырник, валериана)
2. При симптоматических аритмиях назначались бета-адреноблокаторы (метопролол) или антагонисты кальция (верапамил) в минимальных эффективных дозах

Для лечения анемии беременных использовались:

1. Диетические рекомендации (увеличение потребления продуктов, богатых железом)
2. Препараты железа (преимущественно пероральные формы: железа (III) гидроксид полимальтозат, железа фумарат, железа сульфат)
3. При необходимости — витаминно-минеральные комплексы, содержащие фолиевую кислоту, витамин В12

Результаты проведенного лечения показали, что у 89 (88,1 %) беременных с ССЗ удалось достичь стабилиза-

ции состояния и контроля заболевания на амбулаторном этапе. У 12 (11,9 %) беременных возникла необходимость в госпитализации в связи с ухудшением течения основного заболевания или развитием осложнений беременности.

Анализ перинатальных исходов у беременных с ССЗ представлен в таблице 4.

Таблица 4.

Перинатальные исходы у беременных с сердечно-сосудистыми заболеваниями

Показатель	Беременные с ССЗ (n=101)	Беременные без ССЗ (n=39)	p
Преждевременные роды, n (%)	12 (11,9 %)	2 (5,1 %)	0,224
Преэклампсия, n (%)	15 (14,9 %)	2 (5,1 %)	0,108
Плацентарная недостаточность, n (%)	23 (22,8 %)	4 (10,3 %)	0,086
Задержка внутриутробного развития плода, n (%)	18 (17,8 %)	3 (7,7 %)	0,130
Оперативное родоразрешение, n (%)	33 (32,7 %)	8 (20,5 %)	0,151
Масса тела новорожденного <2500 г, n (%)	14 (13,9 %)	3 (7,7 %)	0,315
Оценка по шкале Апгар <7 баллов на 1-й минуте, n (%)	16 (15,8 %)	3 (7,7 %)	0,202
Оценка по шкале Апгар <7 баллов на 5-й минуте, n (%)	7 (6,9 %)	1 (2,6 %)	0,313

Как видно из таблицы 4, у беременных с ССЗ отмечалась тенденция к увеличению частоты осложнений беременности и неблагоприятных перинатальных исходов, однако статистически значимых различий в сравнении с группой беременных без ССЗ не было выявлено, что может быть связано с эффективностью проводимого лечения и наблюдения.

Заключение

Проведенное исследование показало, что сердечно-сосудистые заболевания являются распространенной патологией у беременных женщин (72,1 %), частота которой увеличивается с прогрессированием беременности. Наиболее часто встречаются анемия (39,3 %), артериальная гипертензия (26,4 %) и нарушения ритма сердца (24,3 %). Значимыми факторами риска развития ССЗ у беременных являются возраст старше 30 лет, избыточная масса тела или ожирение, отягощенный семейный анамнез по ССЗ. Комплексный подход к ведению беременных с ССЗ, включающий раннюю диагностику, модификацию образа жизни, медикаментозную терапию (при необходимости) и динамическое наблюдение, позволяет эффективно контролировать течение заболевания и снижать риск осложнений. Разработанный алгоритм ведения беременных с ССЗ в условиях женской консультации может быть использован в практической деятельности врачей акушеров-гинекологов и терапевтов для оптимизации амбулаторного наблюдения и лечения данной категории пациенток.

ЛИТЕРАТУРА

- Адамян Л.В., Артымук Н.В., Белокриницкая Т.Е. и др. Гипертензивные расстройства во время беременности, в родах и послеродовом периоде. Преэклампсия. Эклампсия. Клинические рекомендации. М.; 2021.
- Регистр лекарственных средств России. Энциклопедия лекарств и товаров аптечного ассортимента. М.: РЛС-Медиа; 2022.
- Стрюк Р.И., Бернс С.А., Филиппова М.П. и др. Сердечно-сосудистые заболевания и беременность: национальные рекомендации. Российский кардиологический журнал. 2021;26(3):182–260. DOI: 10.15829/1560–4071-2021-4678
- Чесникова А.И., Коломацкая О.Е., Сафроненко В.А., Скаржинская Н.С. Актуальные вопросы ведения беременных с нарушениями ритма сердца: современный взгляд на проблему. Терапия. 2020;6(1):69–77. DOI: 10.18565/therapy.2020.1.69-77
- Заводчикова Е.Н. Нарушения сердечного ритма у беременных. Лекарственный вестник. 2018;12(1):9–16.
- Коледаев А.К., Коледаева Е.В. Статистика нарушений ритма сердца у беременных. Вятский медицинский вестник. 2019; 4:40–44. DOI: 10.24411/2220–7880-2019-10033
- Можейко Л.Ф., Поух М.А. Особенности течения беременности, родов и перинатальные исходы при нарушениях ритма сердца. Кардиология в Беларуси. 2021;13(4):512–526. DOI: 10.34883/Pl.2021.13.4.002
- Хидирова Л.Д., Кешикова Д.Д., Ольшевская О.К. Желудочковые аритмии при беременности. Тактика ведения пациентов. Атеросклероз. 2023;19(2):162–170. DOI: 10.52727/2078-256X-2023-19-2-162-170

© Рябошапко Алевтина Ивановна (alla.ryaboshapko@yandex.ru); Балашова Марина Евгеньевна (mbalashova13@mail.ru);
 Даудова Диана Асланбековна (ddaoudova99@mail.ru); Чубанова Алина Фейтулаховна (alina.rashidova2000@list.ru);
 Абдурахманова Зульмира Абдурахмановна (zulmira_2002_dmt@yahoo.com); Классов Алибек Мурзабекович (Alibekklassov1989@gmail.com)
 Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СИНДРОМ ФРЕДЕРИКА У КОМОРБИДНОГО ПАЦИЕНТА С МАЛОСИМПТОМНЫМ ТЕЧЕНИЕМ COVID-19

FREDERICK SYNDROME IN A COMORBID PATIENT WITH A LOW-SYMPTOMATIC COURSE OF COVID-19

**I. Semenova
E. Polikarpov
O. Mirolubova**

Summary. A clinical case of a 72-year-old patient with a new coronavirus infection and Frederick syndrome is presented. The reason for hospitalization was the first diagnosis of complete atrioventricular block. The patient had no complaints and symptoms of acute respiratory viral infection with a positive test for coronavirus. The prerequisite for the development of Frederick syndrome was the acute phase of a new coronavirus infection against the background of the existing metabolic syndrome.

Conclusion. Using this clinical case as an example, the danger of an asymptomatic course of a new coronavirus infection as a trigger for the development of Frederick syndrome in comorbid patients with atrial fibrillation was demonstrated.

Keywords: coronavirus infection, Frederick syndrome, atrioventricular block, atrial fibrillation.

Семенова Ирина Артуровна

кандидат медицинских наук, доцент,
ФГБОУ ВО Северный государственный медицинский
университет, г. Архангельск
info@nsmtu.ru

Поликарпов Евгений Константинович

ФГБОУ ВО Северный государственный медицинский
университет, г. Архангельск
info@nsmtu.ru

Миролюбова Ольга Алексеевна

доктор медицинских наук, профессор,
ФГБОУ ВО Северный государственный медицинский
университет, г. Архангельск
info@nsmtu.ru

Аннотация. Представлен клинический случай пациентки 72 лет с новой коронавирусной инфекцией и синдромом Фредерика. Поводом для госпитализации в стационар послужила впервые диагностированная полная атриовентрикулярная блокада. У пациентки отсутствовали жалобы и симптомы острой респираторной вирусной инфекции при положительном тесте на коронавирус. Предпосылкой для развития синдрома Фредерика явилась острая фаза новой коронавирусной инфекции на фоне имеющегося метаболического синдрома.

Заключение. На примере этого клинического случая была продемонстрирована опасность бессимптомного течения новой коронавирусной инфекции, как триггера развития синдрома Фредерика у коморбидных пациентов с фибрилляцией предсердий.

Ключевые слова: коронавирусная инфекция, синдром Фредерика, атриовентрикулярная блокада, фибрилляция предсердий.

Введение

Появившаяся в 2019 году и существующая по настоящий момент, новая инфекция — COVID-19 способствует декомпенсации у пациентов хронических заболеваний. Частыми проявлениями поражения сердечной мышцы являются сердечная недостаточность и разнообразные нарушения ритма сердца. Например, синдром Фредерика, который представляет собой сочетание полной атриовентрикулярной (АВ) блокады и трепетания — фибрилляции предсердий [1].

Для развития данного синдрома необходимы органические изменения миокарда разнообразного характера (склеро-дегенеративные, ишемические, воспалительные) при заболеваниях сердца различной этиологии [4]. В литературе практически не освещается взаимосвязь возникновения коронавирусной инфекции (COVID-19)

и синдрома Фредерика, что делает затронутую проблему актуальной.

Коронавирусная инфекция повреждает миокард, активируя два патологических механизма [5]. При первом SARS-CoV-2 взаимодействует с миокардиальными рецепторами ангиотензин-превращающего фермента 2 (АПФ2). Это непосредственное влияние. Второй механизм представляет собой косвенное повреждение миокарда, обусловленное провоспалительными факторами, нарушением микроциркуляции, гипоксическими изменениями кардиомиоцитов [6,7]. Необходимо помнить, что часть препаратов, применяемые в лечении COVID-19, способны удлинять интервал QT, и тем самым обладать проаритмической активностью [8].

Для проникновения SARS-CoV-2 в клетку необходимо два иона кальция. Такие препараты как нимодипин, ме-

мантин, уменьшают проникновение вируса в клетку [9]. Вирус приводит к запуску патофизиологических процессов, включающих гиперсимпатикотонию, гиперкоагуляцию, системное воспаление, эндотелиальную дисфункцию [10, 11]. COVID-19 часто осложняется развитием ФП, желудочковой экстрасистолии [12].

Синдром Фредерика не имеет специфических клинических проявлений. Он может проявляться приступами потери сознания (приступы Морганьи — Адамса — Стокса), головокружения и слабости, а также брадикардией [2]. Особенностью синдрома Фредерика, которая может привести к трагическим последствиям, является сокращение сердца с частотой 50–60 ударов в минуту. В этом случае нивелируются жалобы на сердцебиение и перебои, пульс становится ритмичным, что можно ошибочно принять за восстановление синусового ритма [2]. Доступным и информативным инструментальным методом диагностики является электрокардиография (ЭКГ), где регистрируется полная АВ-блокады на фоне ФП [13].

Терапевтические мероприятия при синдроме Фредерика заключаются в лечении основного заболевания, коррекции сопутствующей патологии. Электрокардиостимулятор (ЭКС) имплантируется только при развитии блокады с приступами Морганьи — Адамса — Стокса (МАС) и выраженной брадикардией [14].

Клинический случай

Вызов бригады скорой медицинской помощи 05.10.2024 в 08:22 к пациентке К., 72 лет, которая предъявляла жалобы на выраженную общую слабость и головокружение. Со слов дочери, в промежутке 08:00 — 08:10 дважды эпизоды кратковременной (около 1 минуты) потери сознания при попытке встать с постели, которые

пациентка не помнила. Судорог, травм головы не было. Из анамнеза известно, что пациентка страдает ИБС, гипертонической болезнью и сахарным диабетом 2-типа, имеет постоянную форму ФП с 2006 года. Регулярно принимает: апиксабан 5 мг 2 раза в день, периндоприл 4 мг утром, аторвастатин 20 мг вечером, спиронолактон 25 мг утром, торасемид 5 мг утром и днем, бисопролол 1,25 мг утром, L-тироксин 75 мкг утром, гликлазид 60 мг утром, дапаглифлозин 10 мг утром.

При объективном осмотре: состояние средней степени тяжести. Сатурация кислорода (SatO₂) 98 %. Температура тела 36,4 °С. Сознание ясное, без очаговой и общемозговой неврологической симптоматики. Индекс массы тела: 36,02 кг/м² (рост: 158 см, вес: 90 кг); пастозность голеней и стоп. Частота дыхательных движений 18 в минуту; аускультативно в лёгких дыхание везикулярное, в нижних отделах несколько ослаблено с двух сторон, хрипов нет. Тоны сердца при аускультации глухие, ритмичные; частота сердечных сокращений (ЧСС) 32 удара в минуту; АД 130/80 мм рт. ст. на обеих руках. Живот пальпаторно мягкий, безболезненный во всех отделах. Глюкоза капиллярной крови 6,1 ммоль/л.

По данным ЭКГ на месте вызова 05.10.2024 в 08:36: регулярный желудочковый ритм на фоне ФП, ЧСЖ 32 в минуту, брадисистолия. RR: 1,86 сек. QRS: 0,10 сек, QT: 0,56 сек. (Рис. 2).

Ввиду впервые диагностированного синдрома Фредерика принято решение о срочной госпитализации. Обеспечен непрерывный ЭКГ-мониторинг через электроды дефибриллятора и периферический внутривенный доступ, в 08:52 введен 1 мг атропина (без эффекта), после чего в 09:14 выполнено повторное введение атропина (без эффекта). С кардиотонической целью

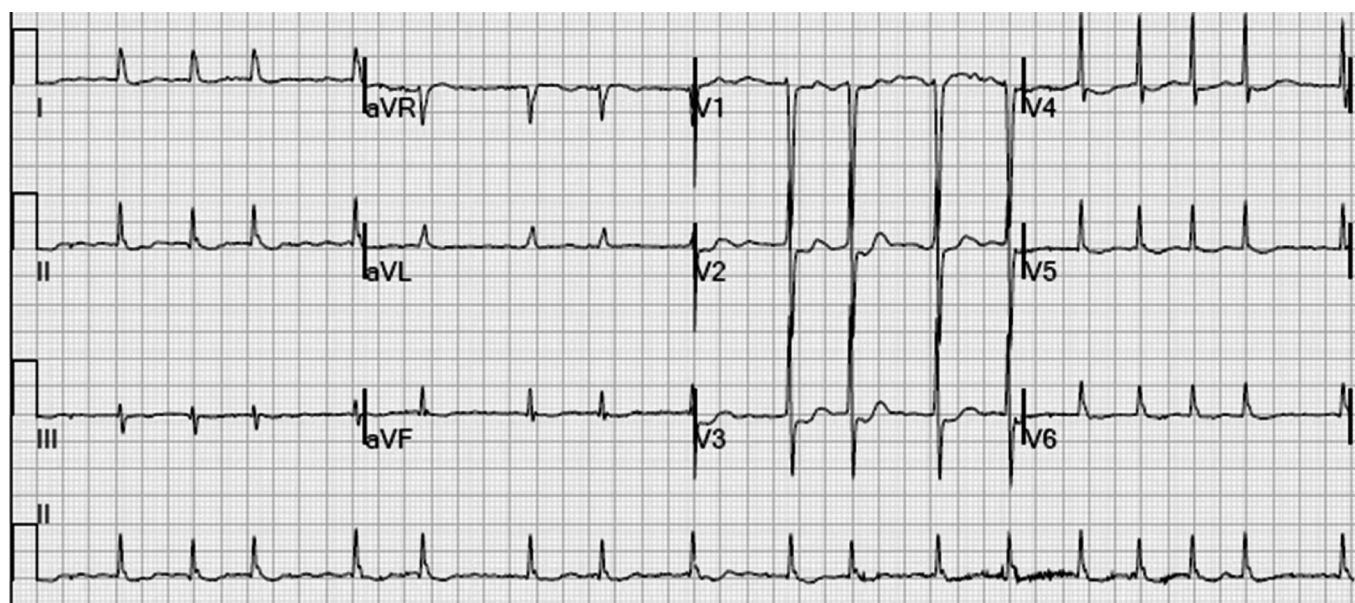


Рис. 1. ЭКГ пациентки от 04.2024 (до настоящего события)

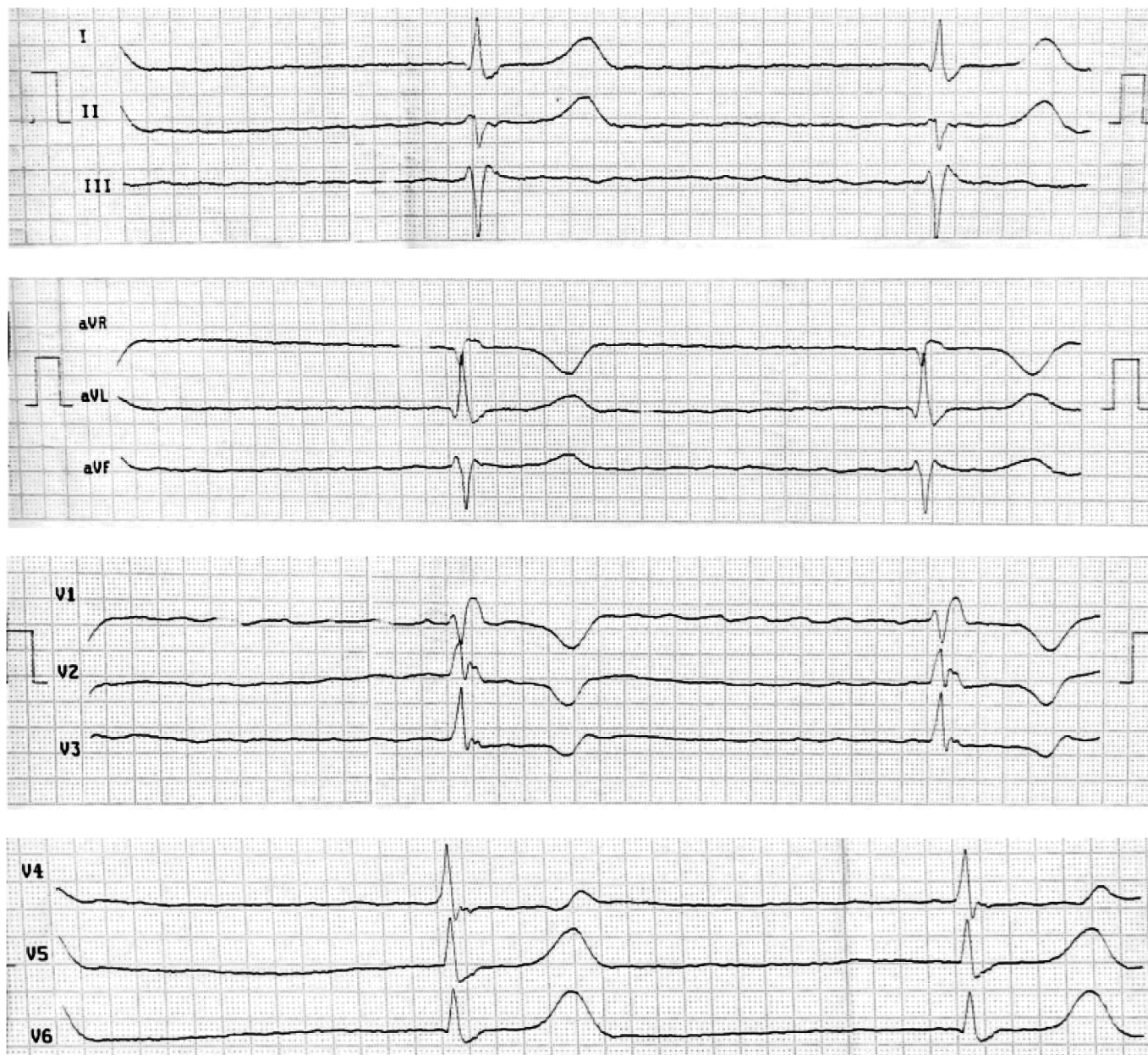


Рис. 2. ЭКГ на месте вызова 05.10.2024 в 08:36

в 09:37 было начато введение внутривенно капельно со скоростью 20 кап/мин 5 мл 0,5 % раствора допамина в разведении 250 мл 0,9 % натрия хлорида. В приёмном отделении стационара медперсоналом в плановом порядке взят экспресс-тест SARS-CoV-2 — положительный. При осмотре катаральных явлений, а также хрипов в легких не выявлено. Согласно маршрутизации, пациентка направлена в инфекционный стационар. Во время транспортировки в 10:16 СМП по ЭКГ зарегистрирована ФП с ЧСЖ 112–135 уд/мин, полная блокада левой ножки пучка Гиса (ПБЛНПГ). Инфузия допамина была прекращена, при этом изменений в самочувствии пациентка не испытывала и в 10:31 была доставлена на приёмный покой инфекционного стационара. (Рис. 3).

В 10:48 на приёмном покое выполнена рентгенография органов грудной клетки (ОГК), показавшая застойные явления в легких.

Пациентка госпитализирована в отделение реанимации (ОАРИТ), где выполнялось динамическое наблюдение, мониторинг основных параметров (сознание АД, ЧД, ЧСС, SatO₂, температура тела, гликемия), лабораторный, инструментальный контроль, осмотр кардиолога. Общий анализ крови при поступлении и в динамике — без отклонений в показателях. В биохимическом исследовании крови отмечалось незначительное повышение лактатдегидрогеназы (до 468 Ед/л), креатинкиназы-МВ (до 31,7 Ед/л). Показатели С-реактивного белка на протяжении пребывания пациентки в стационаре не пре-

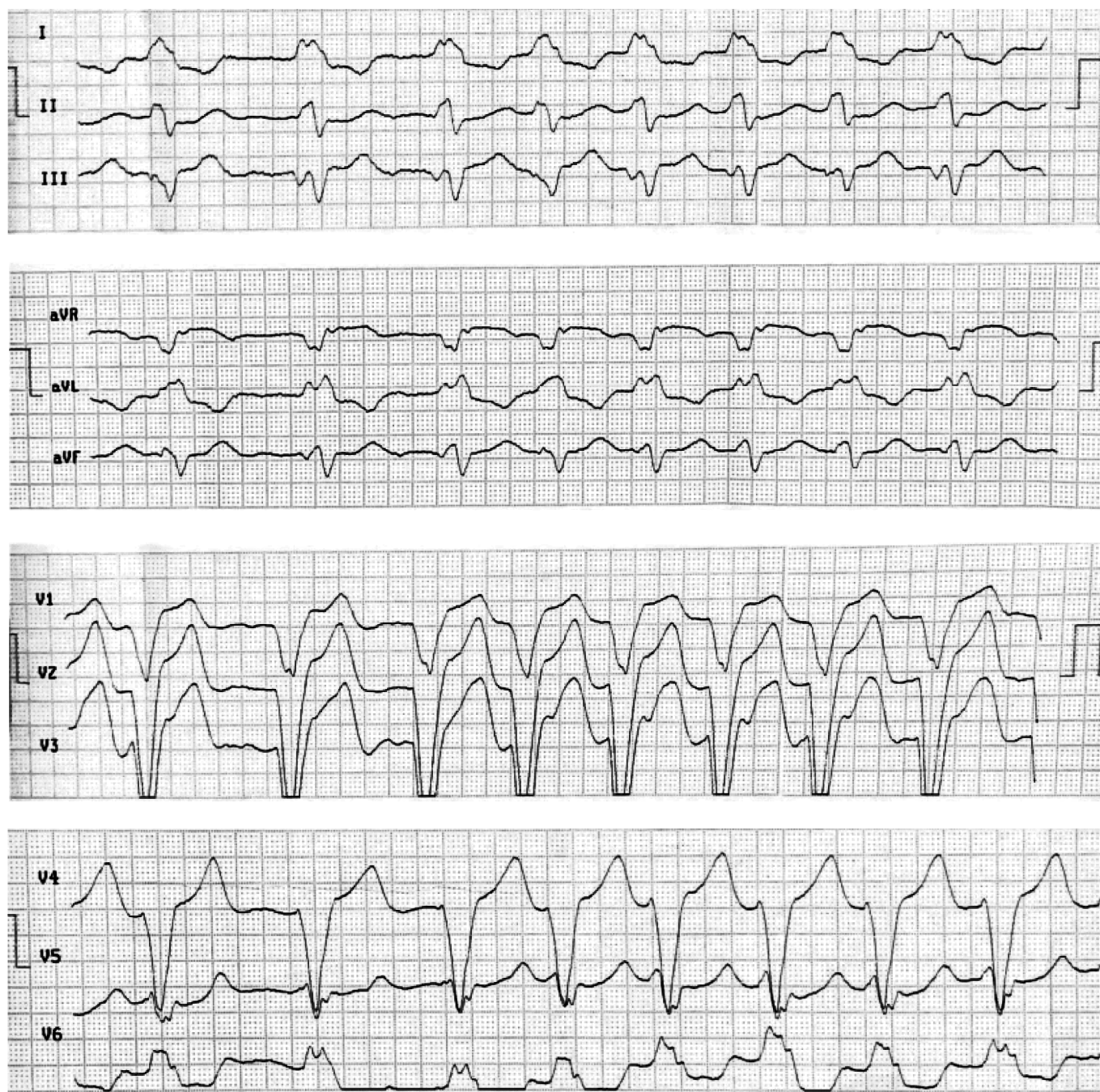


Рис. 3. ЭКГ пациентки от 05.10.2024 в 10:16

вышли 0,4 мг/л. N-концевой фрагмент пропептида натрийуретического пептида В-типа (NT-pro BNP) при поступлении — 1027 пг/мл. В газовом составе: снижение общей концентрации кислорода до 45,1 мм рт. ст., SatO₂ до 72,1 %, оксигемоглобин (fO₂Hb) в артериальной крови составил 71,5 %, ионизированный кальций 0,84 ммоль/л. В коагулограмме: повышение фибриногена по Клауссу (до 6,01 г/л), D-димер — 0,65 мг/л.

Компьютерная томография ОГК от 07.10.2024. Заключение: инфильтративных изменений в легких не выявлено. Застойные изменения в легких. Эхокардиография

+ цветное доплеровское картирование от 07.10.2024: Дилатация предсердий. Концентрическая гипертрофия ЛЖ. Сократимость миокарда желудочков не нарушена (фракция выброса — 57 %). Митральная недостаточность 2 ст. Трикуспидальная недостаточность 1–2 ст. Средняя вероятность легочной гипертензии. Атеросклероз аорты, аортального клапана. ЭКГ от 08.10.24г.: фибрилляция-трепетание предсердий ЧСЖ 74 в мин., ПБЛНПГ. Подозрение на очаговые изменения в переднеперегородочной области ЛЖ. Отмечено снижение нагрузки на правый желудочек.

Пациентка получала следующую терапию: непрерывная ингаляция O_2 через лицевую маску со скоростью 6 л/мин, эносапарин 0,8 мл в сутки подкожно, инфузионная терапия кристаллоидными растворами 400 мл в сутки, молнупиравир 400 мг 2 раза в сутки подкожно, фуросемид 60 мг в сутки внутримышечно, периндоприл 5 мг, бисопролол 5 мг, спиронолактон 25 мг 2 раза в день, торасемид 10 мг утром, аторвастатин 40 мг вечером.

08.10.2024 пациентка ввиду стабилизации состояния и отсутствия рецидивов полной АВ-блокады переведена из ОАРИТ в терапевтическое отделение. Назначенная терапия продолжена с незначительной корректировкой: уменьшена подача кислорода до 3 л/мин, снижена доза бисопролола до 2,5 мг. Лечение и обследование затруднялось сниженной комплаентностью пациентки. 14.10.2024 после получения отрицательного мазка к SARS-CoV-2, отказавшись от дальнейшего нахождения в стационаре, она была выписана с разъяснением подробных рекомендаций о необходимости обследования в амбулаторных условиях по месту жительства. Заключительный клинический диагноз при выписке из стационара: Основное заболевание: 1) Коронавирусная инфекция COVID-19, вирус верифицирован от 05.10.2024, легкое течение 2) ИБС: НРС по типу постоянной формы ФП, нормосистолия. Риск тромбоэмболических осложнений 5 баллов. ПБЛНПГ. Эпизод полной АВ-блокады (синдром Фредерика) от 05.10.2024, Кардиомиопатия сочетанного генеза (гипертоническая, ишемическая, аритмогенная). Недостаточность митрального клапана 2 степени. Недостаточность трикуспидального клапана 2 степени. ХСНсФВ II ст. ФК III. Сопутствующие заболевания: Гипертоническая болезнь III стадия, риск 4, неконтролируемая артериальная гипертензия. Атерогенная дислипидемия. Сахарный диабет 2 типа. Нефропатия сочетанного генеза. ХБП 3А стадия.

Пациентка не соблюдала указанные рекомендации после выписки из стационара. 15.12.2024 около 08:00 рецидивировали жалобы на головокружение, выраженную общую слабость, отмечен эпизод кратковременной потери сознания. Вызванной бригадой СМП диагностирована полная АВ-блокада высокой градации (ЧСС — 20 ударов в минуту), не чувствительная к внутривенному введению атропина, после чего пациентка была госпитализирована в отделение кардиореанимации. В стационаре 15.12.2024 в 10:20 установлен временный ЭКС — восстановлен ритм ФП. 18.12.2024 паци-

ентке имплантирован постоянный ЭКС Attesta VVIR DDD. 25.12.2024 с положительной динамикой и отсутствием рецидивов полной АВ-блокады при удовлетворительном функционировании ЭКС выписана для дальнейшего амбулаторного наблюдения по месту жительства.

Обсуждение

SARS-CoV-2 является в настоящий момент не до конца изученным вирусом. При анализе литературы нам не встретилось описания взаимосвязи коронавирусной инфекции с развитием синдрома Фредерика. А с учётом распространённости ФП 5–15 % среди пациентов пожилого и старческого возраста [15] синдром Фредерика встречается у 0,6–1,5 % [2, 3], т.е. можно предположить, что один пациент из ста имеет полную АВ-блокаду.

Для развития синдрома Фредерика необходимо органическое повреждение миокарда на фоне ИБС, миокардитов и, чаще вторичной, кардиомиопатии. Одним из провоцирующих факторов является приём препаратов с отрицательным дроно- и хронотропным эффектом [2]. Согласно госпитальному регистру передозировок лекарственных препаратов в 2014–2018 гг. синдром Фредерика был зафиксирован у 8,6 % госпитализированных пациентов с лекарственно-индуцированной брадикардией. Можно предположить, что в общей группе пациентов он встречается чаще, так как в данный регистр не вошли больные, которые погибли на догоспитальном этапе, и эти случаи рассматриваются как проявления других заболеваний, в том числе ИБС [16].

Причиной госпитализации в представленном клиническом случае явилась коронавирусная инфекция, проявившаяся впервые выявленным синдромом Фредерика и признаками декомпенсации сердечной недостаточности. И, несмотря на положительную динамику медикаментозного лечения, пациентке со временем понадобилась имплантация ЭКС.

Заключение

На примере этого клинического случая была продемонстрирована опасность бессимптомного течения новой коронавирусной инфекции, как триггера развития синдрома Фредерика у пациентки с метаболическим синдромом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nattel S., Allessie M., Haissaguerre M. Spotlight on atrial fibrillation — the ‘complete arrhythmia’. *Cardiovasc Res.* 2002; 54(2): 197–203. doi: 10.1016/s0008-6363(02)00324-3
2. Трекина Н.Е., Руденко А.В., Урванцева И.А., Саламатина Л.В., Корнеева Е.В. Нормо-брадисистолическая форма фибрилляции предсердий (синдром Фредерика): поздняя диагностика и лечение. *Клиницист.* 2014; 8(1): 58–62. [Trekina N.Ye., Rudenko A.V., Urvantseva I.A., Salamatina L.V., Korneeva Ye.V. A Normal bradysystolic form of atrial fibrillation (Fredericq’s syndrome): Late diagnosis and treatment. *The Clinician.* 2014; 8(1): 58–62. (In Russ.)]. doi: 10.17650/1818-8338-2014-1-58-62
3. Беннет Д.Х. Сердечные аритмии. М.: ГЭОТАРМедиа; 2010. [Bennett D.H. Cardiac arrhythmias. Moscow: GEOTAR-Media; 2010. (In Russ.)].
4. Кушаковский М.С. Аритмии сердца. СПб.: Фолиант; 2007. [Kushakovsky M.S. Cardiac arrhythmias. Saint Petersburg: Foliant; 2007. (In Russ.)].
5. Zheng Y., Ma Y., Zhang J. et al. COVID-19 and the cardiovascular system // *Nat Rev Cardiol.* 2020; 17: 259–260.
6. Huang C., Wang Y., Li X. Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China // *Lancet.* 2020; 6736: 1–10.
7. Kochi A.N., Tagliari A.P., Forleo G.B. et al. Cardiac and arrhythmic complications in patients with COVID-19 // *J Cardiovasc Electrophysiol.* 2020; 31 (5): 1003–1008.
8. Chorin E., Wadhvani L., Magnani S. et al. QT interval prolongation and torsade de pointes in patients with COVID-19 treated with hydroxychloroquine/ azithromycin // *Heart Rhythm.* 2020; 17 (9): 1425–1433.
9. Danta C.C. Calcium Channel Blockers: A Possible Potential Therapeutic Strategy for the Treatment of Alzheimer’s Dementia Patients with SARS-CoV-2 Infection. // *A.C.S Chem Neurosci.* 2020 Aug 5; 11(15): 2145–2148.
10. Porzionato A., Emmi A., Barbon S. et al. Sympathetic activation: a potential link between comorbidities and COVID-19 // *FEBS J.* 2020; 287(17): 3681–3688.
11. Talasz A.H., Kakavand H., Van Tassell B. et al. Cardiovascular Complications of COVID-19: Pharmacotherapy Perspective // *Cardiovasc Drugs Ther.* 2021; 35 (2): 249–259.
12. Suthahar N., Meijers W.C., Sillje H.H.W. et al. From inflammation to fibrosis-molecular and cellular mechanisms of myocardial tissue remodelling and perspectives on differential treatment opportunities // *Curr Heart Fail Rep.* 2017; 14: 235–250.
13. Шехян Г.Г., Ялымов А.А., Шикота А.М., Варенцов С.И., Бонкин П.А., Павлов А.Ю., и др. Клиническая задача по теме: «Дифференциальная диагностика и лечение нарушений сердечного ритма и проводимости сердца (ЭКС + синдром Фредерика)». *РМЖ.* 2016; (9): 594–598. [Shekhyan GG, Yalymov A.A., Shchikota A.M., Varentsov S.I., Bonkin P.A., Pavlov A.Yu., et al. Differential diagnosis and treatment of heart rhythm and conduction disorders (clinical case). *R.M.J. Cardiology.* 2016; (9): 594–598. (In Russ.)].
14. Glikson M., Nielsen J.C., Kronborg M.B., Michowitz Y., Auricchio A., Barbash IM, et al.; ESC Scientific Document Group. 2021 ESC Guidelines on cardiac pacing and cardiac resynchronization therapy. *Eur Heart J.* 2021; 42(35): 3427–3520. doi: 10.1093/eurheartj/ehab364
15. Аракелян М.Г., Бокерия Л.А., Васильева Е.Ю. Голицын С.П., Голухова Е.З., Горев М.В., и др. Фибрилляция и трепетание предсердий. Клинические рекомендации 2020. *Российский кардиологический журнал.* 2021; 26(7): 4594. [Arakelyan M.G., Bockeria L.A., Vasilieva E.Yu., Golitsyn S.P., Golukhova E.Z., Gorev M.V., et al. 2020 Clinical guidelines for atrial fibrillation and atrial flutter. *Russian Journal of Cardiology.* 2021; 26(7): 4594. (In Russ.)]. doi: 10.15829/1560-4071-2021-4594
16. Шохин А.М. Синдром Фредерика. Материалы научно-практической конференции студентов, ординаторов и молодых ученых «Внутренние болезни на до-госпитальном этапе. Эпонимы в современной практике врача». М.: ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России; 2021: 42–46. [Shokhin AM. Frederick’s syndrome. Materials of the scientific and practical conference of students, residents, and young scientists “Internal diseases at the prehospital stage. Eponyms in modern medical practice”. Moscow; 2021: 42–46 (In Russ.)].

© Семенова Ирина Артуровна (info@nsmtu.ru); Поликарпов Евгений Константинович (info@nsmtu.ru);
Миролюбова Ольга Алексеевна (info@nsmtu.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРЕДРАКОВЫЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ КРАСНОЙ КАЙМЫ ГУБ У ЖИТЕЛЕЙ РАЗНЫХ КЛИМАТОГЕОГРАФИЧЕСКИХ ЗОН РЕСПУБЛИКИ ДАГЕСТАН

Юсупова Саният Ашурбековна

Аспирант, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный
медицинский университет», г. Махачкала
saniyat_yusupova@mail.ru

PRECANCEROUS DISEASES OF THE VERMILION BORDER OF THE LIPS AMONG RESIDENTS OF DIFFERENT CLIMATIC AND GEOGRAPHICAL REGIONS OF THE REPUBLIC OF DAGESTAN

S. Yusupova

Summary. A comparative study was conducted on the prevalence of precancerous diseases of the vermilion border of the lips among the adult population of the Republic of Dagestan, depending on the climatic and geographical conditions of residence. A total of 1,673 individuals aged 18 to 90 years from lowland, foothill, and mountainous zones were examined. It was established that the most common condition was lichen planus (28.9 %), followed by papilloma (27.3 %), leukoplakia (11.6 %), and verrucous precancerous lesions (9.6 %). Statistically significant differences in the prevalence of pathologies across the climatic and geographical zones were identified. The highest incidence was observed in the foothill zone, moderate in the mountainous zone, and the lowest in the lowland zone. The obtained data are essential for developing preventive and therapeutic programs considering regional specificities.

Keywords: precancerous diseases, vermilion border of the lips, climatic and geographical zones, lichen planus, papilloma, leukoplakia, Republic of Dagestan.

Аннотация. Проведено сравнительное изучение распространённости предраковых заболеваний красной каймы губ среди взрослого населения Республики Дагестан в зависимости от климатогеографических условий проживания. Обследовано 1673 человека в возрасте от 18 до 90 лет из равнинной, предгорной и горной зон. Установлено, что наиболее распространён красный плоский лишай (28,9 %), далее папиллома (27,3 %), лейкоплакия (11,6 %) и бородавчатый предрак (9,6 %). Выявлены статистически значимые различия распространённости патологий по климатогеографическим зонам. Наибольшая заболеваемость отмечена в предгорной зоне, средняя — в горной и наименьшая — в равнинной. Полученные данные важны для разработки профилактических и лечебных программ с учётом региональных особенностей.

Ключевые слова: предраковые заболевания, красная кайма губ, климатогеографические зоны, красный плоский лишай, папиллома, лейкоплакия, Республика Дагестан.

Введение

Предраковые заболевания красной каймы губ являются актуальной проблемой современной стоматологии в связи с их распространённостью и высоким потенциалом к злокачественной трансформации. Установлено, что среди всех предраковых патологий слизистой оболочки полости рта и губ именно заболевания губ занимают значительное место по частоте встречаемости, что требует особого внимания со стороны специалистов различных профилей медицины [1]. Существующие исследования подтверждают, что распространённость и характер предраковых заболеваний губ значительно варьируют в зависимости от региона проживания, климатических условий, экологических особенностей и социально-экономических факторов [2]. Однако механизмы влияния конкретных климати-

ческих условий на частоту и тяжесть течения таких заболеваний недостаточно подробно изучены и описаны в научной литературе, что ограничивает возможности профилактики и своевременной диагностики данных патологий [3]. Среди наиболее часто диагностируемых предраковых состояний губ выделяются такие формы, как красный плоский лишай, папилломы, лейкоплакия и бородавчатый предрак, которые отличаются длительным течением и относительно высоким риском малигнизации, особенно при несвоевременной диагностике и отсутствии адекватного лечения [4]. Недостаточная изученность региональных особенностей их распространения приводит к сложностям в планировании и реализации профилактических мероприятий, направленных на раннее выявление и снижение уровня заболеваемости среди населения [5]. Республика Дагестан характеризуется выраженной климатической и географической

неоднородностью, включая равнинную, предгорную и горную зоны, что создаёт уникальные условия для оценки влияния различных факторов на распространённость предраковых патологий губ. Тем не менее, научных публикаций, отражающих подробную специфику заболеваемости в зависимости от указанных факторов в данном регионе, явно недостаточно [6].

Изучение данных аспектов позволит не только улучшить понимание этиологии и патогенеза предраковых заболеваний губ, но и разработать эффективные региональные программы по их профилактике и лечению.

Цель исследования — проведение сравнительного анализа структуры и распространённости различных видов предраковых заболеваний красной каймы губ среди взрослого населения Республики Дагестан, проживающего в разных климатогеографических зонах.

Материал и методы исследования

Исследование проведено на базе кафедры стоматологии ФПК и ППС ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации с 2022 по 2024 годы. Клиническими базами исследования являлись республиканская стоматологическая поликлиника, центральные городские и районные больницы со стоматологическими отделениями, сельские врачебные амбулатории и участковые больницы Республики Дагестан. Было обследовано 1673 человека в возрасте от 18 до 90 лет, проживающих в трёх основных климатогеографических зонах республики: равнинной (44 % территории региона), предгорной (15,8 %) и горной (40,2 %). В ходе исследования проведён комплексный стоматологический осмотр с обязательной регистрацией жалоб, сбора анамнеза заболевания и анамнеза жизни, с уточнением наличия сопутствующих соматических заболеваний, вредных привычек и факторов внешней среды. Важное внимание уделено оценке стоматологического статуса с применением стандартного набора стоматологических инструментов и методов. Использовались современные диагностические методики: аутофлуоресцентная стоматоскопия с применением аппарата «АФС» (Д-400, «Полироник», Москва), цитологическое исследование мазков-отпечатков, частичная биопсия с последующим гистологическим исследованием полученного материала. Также пациентам проводились внутривидовая рентгенография, ортопантомография и фотодокументация поражений до и после лечения.

Критериями включения являлись взрослый возраст (от 18 до 90 лет), добровольное согласие на участие и отсутствие соматических патологий в стадии декомпенсации. Из исследования исключались пациенты с подтверждёнными злокачественными новообразова-

ниями губ, тяжёлыми системными заболеваниями в стадии декомпенсации или ремиссии менее шести месяцев, а также лица, регулярно принимающие лекарственные препараты, способные повлиять на стоматологический статус. Статистическая обработка данных выполнена с помощью программ Microsoft Excel 2013 и Statistica 6.0, статистическая значимость принималась при $p < 0,05$.

Результаты исследования

В результате проведённого исследования выявлены значимые различия в распространённости и структуре предраковой патологии красной каймы губ среди взрослого населения различных климатогеографических зон Республики Дагестан. Анализ полученных данных показал, что наиболее распространённой патологией среди обследованных пациентов являлся красный плоский лишай губ, который диагностирован у 483 пациентов, что составляет 28,9 % от общей выборки. Вторым по распространённости заболеванием была папиллома губ, выявленная у 456 человек (27,3 %). Лейкоплакия диагностирована у 194 человек (11,6 %), бородавчатый предрак у 161 пациента (9,6 %), ограниченный предраковый гиперкератоз у 138 обследуемых (8,2 %), гиперплазия губ у 136 человек (8,1 %), а кератоакантома — у 105 пациентов (6,3 %).

Детальный анализ структуры и распространённости выявленных патологий в зависимости от климатогеографических зон проживания позволил определить следующие особенности. Красный плоский лишай достоверно чаще встречался среди жителей горной климатогеографической зоны — 257 случаев (15,4 %), по сравнению с предгорной — 132 случая (7,9 %) и равнинной зонами — 94 случая (5,6 %), различия между зонами были статистически значимыми ($p < 0,05$). В то же время папиллома губ была преимущественно выявлена среди жителей предгорной климатогеографической зоны — 207 человек (12,4 %), что статистически значимо выше, чем в горной зоне — 87 человек (5,2 %), и выше, хотя и достоверно, чем в равнинной зоне — 162 человека (9,7 %).

Лейкоплакия губ также имела достоверно большую распространённость среди жителей предгорной зоны — 102 человека (6,1 %; $p < 0,05$), по сравнению с горной — 60 пациентов (3,6 %) и равнинной зонами — 32 случая (1,9 %). Аналогичная тенденция была выявлена и для бородавчатого предрака губ: наибольшее количество пациентов с данной патологией зарегистрировано в предгорной зоне — 91 человек (5,4 %; $p < 0,05$), в то время как в равнинной зоне выявлено 39 пациентов (2,3 %), а в горной — 31 человек (1,9 %).

Анализ распространённости ограниченного предракового гиперкератоза губ показал достоверно более высокие показатели в предгорной — 65 пациентов (3,9 %;

$p < 0,05$) и горной зонах — 46 пациентов (2,7 %; $p < 0,05$), по сравнению с равнинной зоной, где выявлено всего 27 случаев (1,6 %). Распространённость гиперплазии губ была выше среди населения горной зоны — 57 человек (3,4 %; $p < 0,05$) и равнинной зоны — 50 человек (3 %; $p < 0,05$), по сравнению с предгорной зоной, где выявлено только 29 пациентов (1,7 %).

Что касается кератоакантомы губ, то здесь различия в распространённости между климатогеографическими зонами оказались статистически незначимыми, с небольшим преобладанием случаев в равнинной зоне — 41 пациент (2,5 %), по сравнению с предгорной — 33 пациента (2 %) и горной зонами — 31 случай (1,8 %) ($p > 0,05$).

Таблица 1.

Сравнительная характеристика выявленных случаев предраковых заболеваний губ среди жителей различных климатогеографических зон Республики Дагестан

Предраковые заболевания	Равнинная зона, абс. (%)	Предгорная зона, абс. (%)	Горная зона, абс. (%)	Итого, абс. (%)
Красный плоский лишай	94 (5,6 %) *	132 (7,9 %) **	257 (15,4 %) ***	483 (28,9 %)
Папиллома	162 (9,7 %)	207 (12,4 %) **	87 (5,2 %) ***	456 (27,3 %)
Лейкоплакия	32 (1,9 %) *	102 (6,1 %) **	60 (3,6 %) ***	194 (11,6 %)
Бородавчатый предрак	39 (2,3 %) *	91 (5,4 %) **	31 (1,9 %)	161 (9,6 %)
Ограниченный предраковый гиперкератоз	27 (1,6 %) *	65 (3,9 %)	46 (2,7 %) ***	138 (8,2 %)
Гиперплазия	50 (3 %) *	29 (1,7 %) **	57 (3,4 %)	136 (8,1 %)
Кератоакантома	41 (2,5 %)	33 (2 %)	31 (1,8 %)	105 (6,3 %)
Всего	445 (26,6 %)	659 (39,4 %)	569 (34 %)	1673 (100 %)

Примечание:

* — различия значимы по сравнению с предгорной зоной ($p < 0,05$);

** — различия значимы по сравнению с горной зоной ($p < 0,05$);

*** — различия значимы по сравнению с равнинной зоной ($p < 0,05$).

Полученные в ходе исследования данные демонстрируют отчётливую зависимость структуры и частоты

предраковых заболеваний красной каймы губ от климатогеографических особенностей региона проживания. Такая пространственная вариабельность, с доминированием отдельных нозологических форм в различных природных зонах Республики Дагестан, требует комплексного интерпретативного подхода с учётом патогенетических, экологических и социально-медицинских факторов. Наибольшая суммарная частота предраковых заболеваний зарегистрирована среди жителей предгорной зоны (39,4 %), что, вероятно, связано с сочетанием факторов: высокой инсоляцией, неравномерной влажностью, ветровыми нагрузками, низкой доступностью к специализированной стоматологической помощи и ограниченной просвещённостью населения в вопросах профилактики злокачественных новообразований. Согласно ряду исследований, ультрафиолетовое излучение в субальпийских регионах может усиливать процессы гиперкератинизации и хронизации воспалительных изменений слизистой оболочки губ, что увеличивает риск диспластических изменений [7]. Высокая распространённость папиллом в предгорной зоне (12,4 %) по сравнению с другими зонами указывает на возможную роль вируса папилломы человека (ВПЧ) как значимого этиологического фактора в данной популяции. В литературе подчёркивается, что частота ВПЧ-ассоциированных поражений слизистой оболочки полости рта варьирует в зависимости от социально-экономических условий и уровня гигиенической культуры [8]. Это позволяет предположить, что в данной зоне существует недостаточный уровень санитарной осведомлённости и ограниченный доступ к ранней диагностике вирус-индуцированных поражений. Красный плоский лишай показал наибольшую частоту в горной зоне (15,4 %). Учитывая аутоиммунную природу данного заболевания, можно предположить, что на его формирование могут влиять факторы хронического стресса, психоэмоционального напряжения, гипоксии, характерной для высокогорных районов, а также генетическая предрасположенность [9]. Указанные факторы способны вызывать или усугублять клеточно-опосредованные иммунные реакции, приводящие к персистенции воспалительного процесса в области красной каймы губ. Лейкоплакия, бородавчатый предрак и ограниченный гиперкератоз, в наибольшей степени представленные в предгорной зоне, указывают на возможную роль сочетанных раздражающих факторов: механических, термических, химических, а также хронического микротравмирования слизистой на фоне неблагоприятной экологии и загрязнённости воздуха [10]. Эти компоненты создают благоприятный фон для пролиферативных и диспластических изменений эпителия. Интерес представляет структура гиперплазий, преобладание которых наблюдалось у жителей горной (3,4 %) и равнинной зон (3,0 %). Это может быть связано с различиями в экспозиции к местным раздражающим агентам — пылевым частицам, хронической инсоляции, или механическим нагрузкам (например,

у жителей, занятых в физическом труде на открытом воздухе). Эти изменения, как отмечено в ряде работ, могут индуцировать компенсаторные эпителиальные реакции, которые при длительном воздействии трансформируются в потенциально диспластические изменения [11]. Отсутствие достоверных различий в распространённости кератоакантомы между зонами может свидетельствовать о мультифакторной природе её возникновения и, возможно, меньшем влиянии климатогеографических условий на этот процесс. Согласно данным международных исследований, кератоакантома может развиваться на фоне генетически детерминированных особенностей иммунного ответа и метаболических нарушений, не имеющих прямой связи с региональными климатическими характеристиками. Следует отметить, что различия в структуре предраковой патологии, выявленные в данном исследовании, подчеркивают необходимость индивидуализации профилактических программ. В предгорной зоне целесообразно усилить скрининговые мероприятия, направленные на раннюю диагностику ВПЧ-ассоциированных и гиперкератотических форм, с обязательным цитологическим и гистологическим подтверждением. В горных районах фокус следует сместить на аутоиммунные формы, требующие междисциплинарного наблюдения. В равнинных усло-

виях ключевое внимание должно быть уделено контролю поведенческих факторов риска и формированию здоровых гигиенических привычек.

Исследование не включало лабораторного подтверждения наличия ВПЧ или аутоиммунных маркеров, что ограничивает возможности окончательных выводов о патогенезе выявленных состояний. Кроме того, не учитывались факторы профессиональной принадлежности, уровень образования и поведенческие привычки, что может влиять на интерпретацию результатов.

Выводы

Результаты проведённого исследования подтвердили существование выраженной территориальной дифференциации предраковых заболеваний красной каймы губ у взрослого населения Республики Дагестан, отражающей влияние климатогеографических условий на структуру и частоту нозологических форм. Установленные различия демонстрируют необходимость разработки зонально-специфических профилактических стратегий, ориентированных на раннюю диагностику и мониторинг факторов риска в контексте локальной эпидемиологической и социальной обстановки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дзугаева И.И., Умарова К.В. Анализ структуры заболеваний слизистой оболочки полости рта и красной каймы губ, регистрируемых у взрослого населения на приеме в типовой стоматологической поликлинике // Российский стоматологический журнал. — 2014. — №5. — С. 50–52.
2. Семченко И.М., Макарова О.В., Пронорович О.Н. Предраковые поражения полости рта // Современная стоматология. — 2021. — №4. — С. 31–41.
3. Штанчаева М.М., Ашуев Ж.А., Смирнова Л.Е. Сравнительный анализ соматического статуса у пациентов с хейлитами в различных климатогеографических зонах Республики Дагестан // Институт стоматологии. — 2021. — №4(93). — С. 94–95.
4. Горбатова Е.А., Козлова М.В., Лобачева Е.В. Выявление малигнизации предопухолевых заболеваний слизистой оболочки рта // Кремлевская медицина. — 2020. — №3. — С. 33–37.
5. Зырянов Б.Н. Предраковые заболевания слизистой полости рта и губ у населения Крайнего Севера // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. — 2021. — №3.112. — С. 19–33.
6. Кучиев Г.Г., Алиханов Т.М., Магдиев Р.Т., Абдурахманов А.А. Распространенность и интенсивность болезней пародонта у взрослого населения горной климатогеографической зоны Республики Дагестан // Вестник ДГМА. — 2013. — №4(9). — С. 48–50.
7. Agrawal A., Shindell E., Jordan F., Baeva L., Pfefer J., Godar D.E. UV radiation increases carcinogenic risks for oral tissues compared to skin // Photochemistry and Photobiology. 2013. Vol. 89, No 5. P. 1193–1198.
8. Syrjänen S. Oral manifestations of human papillomavirus infections // European Journal of Oral Sciences. 2018. Vol. 126. P. 49–66.
9. Lai Y.C., Yew Y.W., Schwartz R.A. Lichen planus and dyslipidemia: a systematic review and meta-analysis of observational studies // International Journal of Dermatology. 2016. Vol. 55, No 5. P. e295–e304.
10. Akinkugbe A.A., Garcia D.T., Brickhouse T.H., Mosavel M. Lifestyle risk factor related disparities in oral cancer examination in the U.S: a population-based cross-sectional study // BMC Public Health. 2020. Vol. 20, No 1. P. 153.
11. Ge S., Liu L., Zhou Q., Lou B., Zhou Z., Lou J., et al. Prevalence of and related risk factors in oral mucosa diseases among residents in the Baoshan District of Shanghai, China // PeerJ. 2020. Vol. 8. P. e8644.

© Юсупова Саният Ашурбековна (saniyat_yusupova@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

Наши авторы

Abdurakhmanova Z. — Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Artemova S. — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, MIRAEА=Russian Technological University

Arzhaeva I. — Candidate of Medical Sciences, Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky

Balashova M. — Candidate of Medical Sciences, associate professor, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Baratashvili K. — Postgraduate Student, Saint Petersburg State University

Barybkina M. — Candidate of Biological Sciences, Lomonosov Moscow State University

Bezrukih A. — graduate student, Moscow Timiryazev Agricultural Academy

Bezrukikh E. — technician of the 1st category, FSBI VNIPO EMERCOM of Russia

Bobyр-Bukhanovsky A. — laboratory assistant, MIREA — Russian University of Technology

Brysin A. — Candidate of Technical Sciences, associate professor, A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, MIRAEА=Russian Technological University

Chernikov A. — postgraduate student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MSTU "Stankin"

Chervakov Ph. — National Research Nuclear University «MEPhI»

Chiskidov S. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Academy of Civil Protection EMERCOM of Russia

Chubanova A. — Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Daudova D. — Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Dudnikov V. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ukhta State Technical University

Feklisov V. — Postgraduate Student, Moscow Polytechnic Institute; Project Manager, National Agency for Qualifications Development, Moscow

Our authors

Gantts I. — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, RTU MIREA, Moscow

Glinkin M. — Postgraduate student, Moscow State University of Technology «Stankin»

Gofman M. — Doctor of Technical Sciences, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Golembiovskaya O. — Candidate of technical sciences, Bryansk State Technical University

Gorbachev I. — Postgraduate student, Bryansk State Technical University

Grinev A. — Candidate of Biological Sciences, associate professor, First Moscow State Medical University I.M. Sechenov

Ippolitova E. — Research Fellow, NPO Neurosurgery, Irkutsk Scientific Center of Surgery and Traumatology

Ivanova E. — candidate of medical sciences, associate professor, Privolzhsky Research Medical University, Nizhny Novgorod

Khananov K. — Postgraduate student, Russian Presidential Academy of National Economy, and Public Administration

Kinash I. — Candidate of Biological Sciences, Research Fellow, NPO Neurosurgery, Irkutsk Scientific Center of Surgery and Traumatology

Kirilina Yu. — Candidate of Economic Sciences, associate professor RTU MIREA

Klassov A. — Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky

Koshelev N. — postgraduate student, Penza State University

Kovalchuk A. — graduate student, FGOU IN MSTU "Stankin", Moscow

Kovatsenko I. — Postgraduate student, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Kryuchkov A. — graduate student, senior lecturer, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «MIREA — Russian Technological University»

Kulikova O. — Associate Professor, Don State Technical University, Rostov-on-Don

Lavrushin V. — RTU MIREA

Lazareva V. — Doctor of Biological Sciences, Professor, Ukhta State Technical University

Lomonosov G. — Laboratory assistant, RTU MIREA

Maksimov D. — National Research Nuclear University «MEPhI»

Matsaeva O. — Intern researcher, First Moscow State Medical University I.M. Sechenov

Mikhailova A. — Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky

Mikhaylov V. — Volgograd State Technical University

Mikheeva E. — Post-graduate student, Moscow City University (MCU)

Mirolubova O. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Northern State Medical University», Arkhangelsk

Molkova L. — Graduate student, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Mosina L. — Doctor of biological sciences, Professor, Moscow Timiryazev Agricultural Academy

Nemtseva L. — Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky

Novikov K. — postgraduate student, Penza State University

Novoselova O. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow State University of Technology «Stankin»

Parshin A. — Candidate of Medical Sciences, Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky

Pastuhova Ju. — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «MIREA — Russian Technological University»

Pechenkin V. — Doctor of Sociology, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Petrunev E. — MIREA — Russian Technological University, Moscow

Petrinin M. — RTU MIREA, Moscow

Pinigin A. — Don State Technical University, Rostov-on-Don

Polikarpov E. — Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Northern State Medical University», Arkhangelsk

Polskikh S. — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I

Popov V. — Graduate student, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS)

Potapova D. — teacher, senior research fellow, MIRAEA=Russian Technological University

Rebrov E. — Graduate student, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Romanovskaya A. — Doctor of Medical Sciences, Director, Clinic of Obstetrics and Gynecology, Chief Freelance Gynecologist at the Ministry of Health of the Saratov Region, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Romashkova O. — Doctor of Engineering, Professor, Russian Presidential Academy of National Economy, and Public Administration, Moscow

Rusakov A. — Senior lecturer, MIREA — Russian University of Technology

Rusinova A. — FSBOU VSMU named after N.N. Burdenko

Ryaboshapko A. — Candidate of Medical Sciences, associate professor, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Rytov M. — Associate professor, Bryansk State Technical University

Semenova I. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Northern State Medical University», Arkhangelsk

Seratirova V. — Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Ukhta State Technical University

Shakhov M. — Postgraduate student, Kosygin Russian State University

Sharara Simbarashe — Graduate student, Moscow State Technological University «Stankin»

Shemet A. — Pacific State University, Khabarovsk

Shmakov K. — MIREA – Russian Technological University, Moscow

Sizonova N. — FSBI VNIPO of the Ministry of Emergency Situations of Russia

Sokolov A. — MIREA=Russian Technological University

Suzdalsky D. — Postgraduate Student, Russian University of Economics, Moscow

Tarasov A. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, FGOU V MSTU “Stankin”, Moscow

Trushin S. — Senior Lecturer, MIREA – Russian Technological University, Moscow

Tsyslyak E. — Research Fellow, NPO Neurosurgery, Irkutsk Scientific Center of Surgery and Traumatology

Ulanov K. — Postgraduate Student, Moscow State Technological University “Stankin”

Ulengova T. — Senior Lecturer, Pacific State University, Khabarovsk

Uvarov K. — Postgraduate student, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”

Valeev S. — Doctor of Technical Sciences, Professor, Ufa University of Science and Technology

Verkhozina T. — Candidate of Medicine, Irkutsk State Medical Academy of Postgraduate Education — Branch, Campus Russian Medical Academy of Continuing Professional Education

Yagolnitzer O. — Candidate of Technical Sciences, FGAOU VO «MSTU «STANKIN»

Yaroschuk P. — Postgraduate Student, Voronezh State University

Yurkov N. — Doctor of Technical Sciences, Penza State University

Yusupova S. — postgraduate student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Dagestan State Medical University», Makhachkala

Zavitaev K. — Postgraduate student, FGAOU VO «MSTU «STANKIN»

Zhang Xilu — Postgraduate student, Ufa University of Science and Technology

Zhivotenko A. — Research Fellow, NPO Neurosurgery, Irkutsk Scientific Center of Surgery and Traumatology

Zimina A. — Intern researcher, First Moscow State Medical University I.M. Sechenov

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).