

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия
Юго-Западного
государственного университета
Серия: Управление, вычислительная
техника, информатика. Медицинское
приборостроение

Научный журнал

Том 15 № 4 / 2025

Proceedings
of the Southwest
State University

Series: Control, Computer Engineering,
Information Science. Medical
Instruments Engineering

Scientific Journal

Vol. 15 № 4 / 2025



**Известия Юго-Западного
государственного университета.
Серия: Управление, вычислительная
техника, информатика. Медицинское приборостроение
(Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta.
Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika.
Meditinskoe priborostroenie)**

Научный рецензируемый журнал

Основан в 2011 г.

Цель издания – публичное представление научно-технической общественности научных результатов фундаментальных, проблемно-ориентированных научных исследований в таких областях, как информационные и интеллектуальные системы, мехатроника и робототехника, распознавание и обработка изображений, системный анализ и принятие решений, моделирование в медицинских и технических системах, приборы и методы контроля природной среды.

В журнале публикуются оригинальные работы, обзорные статьи, рецензии и обсуждения, соответствующие тематике издания.

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

Целевая аудитория: научные работники, профессорско-преподавательский состав образовательных учреждений, экспертное сообщество, молодые ученые, аспиранты, заинтересованные представители широкой общественности.

Журнал придерживается политики открытого доступа. Полнотекстовые версии статей доступны на сайте журнала, научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

Журнал включен в перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора наук, кандидата наук по следующим научным специальностям:

2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки).

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки).

2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки).

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки).

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки).

2.3.8. Информатика и информационные процессы (технические науки).

3.3.9. Медицинская информатика (медицинские науки).

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Емельянов Сергей Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, ректор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Томакова Римма Александровна, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Агарков Николай Михайлович, д-р мед. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия)

Гонтарев Сергей Николаевич, д-р мед. наук, профессор, Белгородский государственный национальный исследовательский университет (г. Белгород, Россия)

Будневский Андрей Валерьевич, д-р мед. наук, профессор, Воронежский государственный медицинский университет им. Н. Н. Бурденко Минздрава России (г. Воронеж, Россия)

Зайченко Кирилл Владимирович, д-р техн. наук, профессор, Институт аналитического приборостроения Российской академии наук (г. Санкт-Петербург, Россия)

Зо Зо Тун, канд. техн. наук, профессор, Военный институт сестринских и парамедицинских наук (г. Янгон, Мьянма)

Истомина Татьяна Викторовна, д-р техн. наук, профессор, Московский государственный гуманитарно-экономический университет (г. Москва, Россия)

Кореневский Николай Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия)

Коровин Евгений Николаевич, д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия)

Маслак Анатолий Андреевич, д-р техн. наук, профессор, Кубанский государственный университет (г. Краснодар, Россия)

Подмастерьев Константин Валентинович, д-р техн. наук, профессор, Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева (г. Орел, Россия)

Разинкин Константин Александрович, д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия)

Риад Таха Аль-Касасбех, д-р техн. наук, профессор, Университет Аль-Балка (г. Амман, Иордания)

Серегин Станислав Петрович, д-р мед. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия)

Таныгин Максим Олегович, д-р техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия)

Тарасов Сергей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Южный Федеральный университет (г. Ростов-на-Дону, Россия)

Филист Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия)

Филонович Александр Владимирович, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия)

Чернов Николай Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Южный Федеральный университет (г. Ростов-на-Дону, Россия)

Чопоров Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия)

Шаталова Ольга Владимировна, д-р техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, Россия)

Якунченко Татьяна Игоревна, д-р мед. наук, профессор, Белгородский государственный национальный исследовательский университет (г. Белгород, Россия)

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Адрес учредителя, издателя и редакции:

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

Телефон: +7(4712) 22-25-26,

Факс: +7(4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Типография:

Полиграфический центр
Юго-Западного государственного
университета, 305040, г. Курск,
ул. 50 лет Октября, 94

16+

Подписка и распространение:

журнал распространяется
по подписке.

Подписной индекс журнала 44288
в объединенном каталоге
«Пресса России».

Периодичность: четыре раза в год

Свободная цена.

Оригинал-макет подготовлен О. А. Леоновой

Подписано в печать 26.12.2025. Формат 60×84/8.

Дата выхода в свет 30.12.2025.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 28,9.

Тираж 1000 экз. Заказ 57.

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
(ПИ №ФС77-82285 от 23.11.2021).

ISSN 2223-1536 (Print)

Префикс DOI: 10.21869

Сайт журнала: <https://swsu.ru/izvestiya/seriesivt/>

© Юго-Западный государственный университет, 2025

 Материалы журнала доступны
под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License



Proceedings of the Southwest State University.

Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering

Peer-reviewed scientific journal

Published since 2011

These Proceedings present the results of scientific fundamental and applied research in such areas as information and intelligent systems; mechatronics, robotics; image recognition and processing; system analysis and decision making; simulation in medical and technical systems; devices and methods for monitoring the natural environment.

The journal publishes scientific articles, critical reviews, reports and discussions in the above mentioned areas.

All papers are published free of charge.

Target readers are scientists, university professors and teachers, experts, young scholars, graduate and post-graduate students, stakeholders and interested public.

The Editorial Board of the journal pursues open access policy. Complete articles are available at the journal web-site and at eLIBRARY.RU .

The journal is included into the Register of the Top Scientific Journals of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation as a journal recommended for the publication of the findings made by the scientists working on a doctoral or candidate thesis in the following areas:

2.2.4. Devices and methods of measurement (by type of measurement) (technical Sciences).

2.2.8. Methods and devices for monitoring and diagnosing materials, products, substances and the natural environment (technical Sciences).

2.2.12. Devices, systems and medical devices (technical Sciences).

2.2.15. Telecommunication systems, networks and devices (technical Sciences).

2.3.1. System analysis, management and information processing (by industry) (technical Sciences).

2.3.8. Informatics and information processes (technical sciences).

3.3.9. Medical informatics (medical sciences).

EDITOR-IN-CHIEF

Sergei G. Emelianov, Dr. of Sci. (Engineering), Correspondent Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, a Holder of the Russian Government Prize in the Field of Science and Engineering, Rector of the Southwest State University (Kursk, Russia)

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Rimma A. V. Tomakova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

EDITORIAL BOARD

Nikolai M. Agarkov, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

Oleg N. Choporov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)

Andrey V. Budnevsky, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Voronezh State Medical University named after N. N. Burdenko (Voronezh, Russia)

Sergey A. Filist, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

Nikolay N. Chernov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia)

Alexander V. Filonovich, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

Sergei N. Gontarev, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Belgorod State National Research University (Belgorod, Russia)

Tatiana V. Istomina, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Moscow State University of Humanities and Economics (Moscow, Russia)

Nikolay A. Korenevsky, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

Evgeny N. Korovin, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)

Anatoly A. Maslak, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Kuban State University (Krasnodar, Russia)

Konstantin V. Podmastercav, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Orel State University named after I. S. Turgenev (Orel, Russia)

Konstantin A. Razinkin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)

Stanislav P. Seregin, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

Maxim O. Tanygin, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

Riad Taha Al-Kasasbeh, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Al-Balqa University (Amman, Jordan)

Olga V. Shatalova, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

Sergey P. Tarasov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia)

Tatiana I. Yakunchenko, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Belgorod State National Research University (Belgorod, Russia)

Kirill V. Zaichenko, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Institute for Analytical Instrumentation Russian Academy of Sciences (St. Petersburg, Russia)

Zhanybai T. Zhusubaliev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

Zo Zo Tun, Cand. of Sci. (Engineering), Professor, Military Institute of Nursing and Paramedical Sciences (Yangon, Myanmar)

Founder and Publisher:

“Southwest State University”

Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

Phone: (+74712) 22-25-26,

Fax: (+74712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

The Journal is officially registered by:

The Federal Supervising Authority in the Field of Communication,

Information Technology and Mass media

(PI №FS77-82285 of 23.11.2021).

ISSN 2223-1536 (Print)

DOI Prefix: 10.21869

Web-site: <https://swsu.ru/izvestiya/seriesivt/>

Printing office:

16+

Printing Center
of the Southwest State University,

50 Let Oktyabrya str., 94,
Kursk 305040, Russian Federation

Subscription and distribution:

the journal is distributed by subscription.

Subscription index 44288

in the General Catalogue “Pressa Rossii”

Frequency: Quarterly

Free price

Original lay-out design: O. A. Leonova

© Southwest State University, 2025

 Publications are available in accordance with
the Creative Commons Attribution 4.0 License

Signed for printing 26.12.2025. Format 60×84/8.

Release date 30.12.2025.

Offset paper. Printer's sheets: 28,9.

Circulation 1000 copies. Order 57.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ	8
Длина когнитивного пути итерационного снижения энтропии бинарных кодовых последовательностей от первоначального хаоса (идеального «белого» шума) до детерминизма монотонности.....	8
Иванов А. И.	
Проектирование ядра информационной системы на основе workflow-движка.....	22
Пинаев А. А., Томакова Р. А., Реутов Д. К., Фомин Д. А.	
Семантически-инвариантное кондиционирование диффузионных моделей: унифицированный фреймворк для кросс-модельного позитивного промптинга.....	35
Зоткина А. А., Мартышкин А. И., Павлов А. А., Ткаченко А. В.	
О некоторых аспектах цифровизации управления образовательным процессом	50
Акальев В. Л., Борисенко А. В., Пироженко Ю. А., Новикова Е. А.	
МЕХАТРОНИКА, РОБОТОТЕХНИКА.....	67
Метод и алгоритмы управления группировкой наноспутников.....	67
Титенко Е. А., Шиленков Е. А., Фролов С. Н., Соглаев В. П., Тетерин Д. П., Атакищев О. И.	
Математическое моделирование движения стопы при ходьбе по подвижному горизонтальному основанию.....	89
Яцун С. Ф., Фурсов Г. А., Сидорова А. А.	
Оценка возможности применения квантовой криптографии и протокола LoRaWAN 2 для установления связи с беспилотным летательным аппаратом	107
Алемпьев М. Ю., Колтев Д. С., Довбня В. Г., Ревякина М. О.	
РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ	123
Структурный синтез нейросетевых моделей биометрического распознавания в пространстве вторичных признаков многомерных динамических кривых.....	123
Данилов Е. А., Танцеров А. Х.	
Методика интегративной анатомической оценки стопы	137
Смирнова Л. М., Михайлишин В. В.	
Исследования алгоритмов нейросетевого распознавания динамической подписи пользователя в пространстве отсчетов многомерных кривых в сравнении с оптимальными алгоритмами обнаружения-различений многомерных сигналов.....	150
Танцеров А. Х., Данилов Е. А.	
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ.....	162
Система поддержки принятия врачебных решений в трансплантологии при подборе реципиентов для пересадки донорских органов.....	162
Галушкина Е. Н., Галушин П. В., Гильдеева К. А.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	175
Применение методологии тензорного и кластерного анализа для моделирования процессов функционального состояния объектов критической информационной инфраструктуры в условиях деструктивных электромагнитных воздействий	175
Двилянский А. А.	
Оценка эффективности модели глубокого обучения на основе EfficientNetB3 для дифференциальной диагностики стадий болезни Альцгеймера.....	192
Киселев А. В., Кулешова Е. А., Таныгин М. О., Свинухов П. М., Халин И. А.	
Модели биоимпедансного картирования на основе эквивалентных многополюсников в системах интеллектуальной поддержки заболеваний легких	211
Лях А. В., Филист С. А., Шаталова О. В., Башмакова И. А., Шульга Л. В.	
Рационализация диагностики и прогнозирования исходов черепно-мозговой травмы по биомаркерам крови	235
Лысенко А. С., Агарков Н. М., Якунченко Т. И., Гонтарев С. Н., Шмарова Д. Р., Шорохова А. А.	
К сведению авторов.....	249

CONTENT

INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS	8
Length of the cognitive path of iterative reduction of the entropy of binary code sequences from the initial chaos (ideal "white" noise) to the determinism of monotonicity	8
<i>Ivanov A. I.</i>	
Designing the core of an information system based on a workflow engine: a comparative analysis of approaches	22
<i>Pinaev A. A., Tomakova R. A., Reutov D. K., Fomin D. A.</i>	
Semantically invariant conditioning of diffusion models: a unified framework for cross-model positive prompting.....	35
<i>Zotkina A. A., Martyshkin A. I., Pavlov A. A., Tkachenko A. V.</i>	
On some aspects of digitalization of educational process management.....	50
<i>Akapyev V. L., Borisenco A. V., Pirozhenko Y. A., Novikova E. A.</i>	
MECHATRONICS, ROBOTICS	67
Method and algorithms for control of a construction of nano-satellites.....	67
<i>Titenko E. A., Schilenkov E. A., Frolov S. N., Soglaev V. P., Teterin D. P., Atakishchev O. I.</i>	
Mathematical modeling of gait on a movable horizontal base	89
<i>Yatsun S. F., Fursov G. A., Sidorova A. A.</i>	
Evaluation of the possibility of using quantum cryptography and the LoRaWAN 2 protocol to establish communication with an unmanned aerial vehicle	107
<i>Alempiev M. Y., Koptev D. S., Dovbnya V. G., Revyakina M. O.</i>	
IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING	123
Structural synthesis of neural network models for biometric recognition in the feature space of multidimensional dynamic curves	123
<i>Danilov E. A., Tantserov A. K.</i>	
The method of integrative anatomical assessment of the foot.....	137
<i>Smirnova L. M., Mikhailishin V. V.</i>	
Research on neural network algorithms for user dynamic signature recognition in the space of multidimensional curve samples, in comparison with optimal detection–discrimination algorithms for multidimensional signals	150
<i>Tantserov A. K., Danilov E. A.</i>	
SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING	162
Medical decision support system in transplantology for selecting donor organ transplantation recipients.....	162
<i>Galushina E. N., Galushin P. V., Gildeeva K. A.</i>	
MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS	175
Application of tensor methodology and cluster analysis in modeling processes related to the assessment of the functional state of critical information infrastructure objects under destructive electromagnetic impacts.....	175
<i>Dvilianskiy A. A.</i>	
Evaluation of the effectiveness of a deep learning model based on EfficientNetB3 for differential diagnosis of Alzheimer's disease stages.....	192
<i>Kiselev A. V., Kuleshova E. A., Tanygin M. O., Svinuhov P. M., Khalin I. A.</i>	
Bioimpedance mapping models based on equivalent multipole networks in intelligent lung disease support systems.....	211
<i>Lyakh A. V., Filist S. A., Shatalova O. V., Bashmakova I. A., Shulga L. V.</i>	
Rationalization of diagnosis and prediction of traumatic brain injury outcomes by blood biomarkers	235
<i>Lysenko A. S., Agarkov N. M., Yakunchenko T. I., Gontarev S. N., Shmarova D. R., Shorokhova A. A.</i>	
Information for Authors.....	249

Длина когнитивного пути итерационного снижения энтропии бинарных кодовых последовательностей от первоначального хаоса (идеального «белого» шума) до детерминизма монотонности

А. И. Иванов¹ 

¹ Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт
ул. Советская, д. 9, г. Пенза 440000, Российская Федерация

 e-mail: bio.ivan.penza@mail.ru

Резюме

Целью исследования является показ возможности оценки уровня когнитивности через снижение энтропии кодовой последовательности. При полном хаосе нет порядка, однако эволюция, естественный интеллект и искусственный интеллект способны противодействовать беспорядку, постепенно его уменьшая.

Методы. Энтропия Шеннона канонизирована и описана во всех учебниках, однако как инструмент практического применения она ущербна из-за огромной вычислительной сложности ее оценок. Тем не менее в этом веке стали активно разрабатываться альтернативные подходы, существенно упрощающие вычисления. В частности, энтропия в пространстве расстояний Хэмминга должна иметь линейную вычислительную сложность, а энтропия корреляционной цепленности разрядов кода должна иметь квадратичную вычислительную сложность. Проблема состоит лишь в том, что энтропия Хэмминга и энтропия корреляционной цепленности разрядов имеют собственные шкалы, не совпадающие со шкалой энтропии Шеннона.

Результаты. Метрик энтропии должно быть множество, одной из таких метрик является длина когнитивного пути от хаоса «белого» шума до полного детерминизма и монотонности. В статье приведена программная реализация оценки подобной метрики. Показано, что длина когнитивного пути сводится как к расстояниям Хэмминга, так и к коэффициентам корреляции между возникающими кодовыми последовательностями.

Заключение. Предложенная метрика длины когнитивного пути, видимо, должна иметь свою собственную энтропийную шкалу, не совпадающую со шкалой энтропии Шеннона. Все это следует рассматривать как удобный для практического применения частный случай некоторой упрощенной оценки сложной в вычислительном отношении задачи. По крайней мере, приведенную в статье программу можно рассматривать как еще одну систему тестов качества криптографического ключа, имеющую полиномиальную вычислительную сложность.

Ключевые слова: энтропия Шеннона; энтропия Хэмминга; энтропия корреляционных связей; энтропия когнитивного упрощения.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Иванов А. И. Длина когнитивного пути итерационного снижения энтропии бинарных кодовых последовательностей от первоначального хаоса (идеального «белого» шума) до детерминизма монотонности // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 4. С. 8–21. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-8-21>

Поступила в редакцию 17.10.2025

Подписана в печать 15.11.2025

Опубликована 26.12.2025

Length of the cognitive path of iterative reduction of the entropy of binary code sequences from the initial chaos (ideal "white" noise) to the determinism of monotonicity

Alexander I. Ivanov¹ 

¹ Penza Research Institute of Electrical Engineering
9 Sovetskaya Str., Penza 440000, Russian Federation

 e-mail: bio.ivan.penza@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to demonstrate the possibility of assessing the level of cognition by reducing the entropy of the code sequence. In complete chaos there is no order, but evolution, natural intelligence and artificial intelligence are able to counteract disorder, gradually reducing it.

Methods. Shannon entropy is canonized and described in all textbooks, but as a tool for practical application it is flawed due to the enormous computational complexity of its estimates. However, in this century, alternative approaches have been actively developed that significantly simplify calculations. In particular, the entropy in the space of Hamming distances should have a linear computational complexity, and the entropy of the correlation entanglement of code bits should have a quadratic computational complexity. The only problem is that the Hamming entropy and the entropy of the correlation entanglement of bits have their own scales that do not coincide with the Shannon entropy scale.

Results. There should be many entropy metrics, one of such metrics is the length of the cognitive path from the chaos of "white" noise to complete determinism and monotony. The article provides a software implementation of the assessment of such a metric. It is shown that the length of the cognitive path is reduced to both the Hamming distances and the correlation coefficients between the resulting code sequences.

Conclusion. The proposed cognitive path length metric should apparently have its own entropy scale, which does not coincide with the Shannon entropy scale. All this should be considered as a convenient for practical use special case of some simplified evaluation of a computationally complex problem. At least, the program given in the article can be considered as another system of cryptographic key quality tests, which has polynomial computational complexity.

Keywords: Shannon entropy; Hamming entropy; entropy of correlation links; entropy of cognitive simplification.

Conflict of interest: The Authors declares the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Ivanov A.I. Length of the cognitive path of iterative reduction of the entropy of binary code sequences from the initial chaos (ideal "white" noise) to the determinism of monotonicity. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo*

Received 17.10.2025

Accepted 15.11.2025

Published 26.12.2025

Введение

В середине прошлого века Клод Шеннон создал формулу для оценки информационной энтропии. Теоретическая значимость формулы Шеннона неоспорима, и сегодня она присутствует во всех учебниках. С практической точки зрения подобная оценка энтропии затруднительна для больших размерностей длины криптографического ключа:

$$H("x_1, x_2, \dots, x_{256}") = -\sum_{i=1}^N P_i \cdot \log(P_i), \quad (1)$$

где $N \approx 2^{256}$ из-за того, что вероятность появления каждого i -го кодового состояния P_i мала. Чем выше число переменных в (1), тем больше нужна выборка для корректной оценки доверительной вероятности.

К сожалению, попытки оценки энтропии, по Шеннону, имеют экспоненциальную вычислительную сложность. В связи с этим качество криптографических ключей оценивается с использованием гораздо более простых в вычислительном отношении тестов [1].

Таким образом, научно-техническая общественность вынужденно двигается по пути замены сложной в вычислительном отношении оценки (1) к использованию группы более простых в вычислительном отношении тестов Национального института стандартов США. При этом этих тестов недостаточно [2], в общем случае базовой величиной остается энтропия [3].

Материалы и методы

Переход от анализа статистик обычных кодов в пространство расстояний Хэмминга

Одним из перспективных направлений исследований в контексте упрощения оценок энтропии является переход от статистического анализа обычных кодов к статистическому анализу в пространстве расстояний Хэмминга. То, что этот технический прием создан исследователями биометрических технологий, не случайно подтверждается использованием этой метрики в протоколах «биометрико-криптографического рукопожжания» [4]. Кроме того, расстояния Хэмминга и коэффициенты корреляции между кодами применимы и в других схемах аутентификации [5]. При этом попытки стандартизации «нечетких экстракторов» [6] оказались неудачными из-за многообразия их вариантов и низкой длины эквивалентного криптографического ключа аутентификации. Тем не менее расстояние Хэмминга оказалось полезным при оценках энтропии Шеннона для ключей биометрической аутентификации [7].

«Нечеткие экстракторы», активно создаваемые зарубежными исследователями в конце прошлого века, построены на том, что выполняется квантование «сырых» биометрических данных, при этом выполняется сравнение с порогом, совпадающим с математическим ожиданием предъявленной выборки биометри-

ческих данных. В итоге наиболее качественные биометрические параметры анализа рисунка радужной оболочки глаза позволяют получить код из 2096 бит после квантования «сырых» биометрических параметров. При этом ошибочных бит после квантования «сырых» данных оказывается много (наблюдается порядка 30% ошибочных бит). Технология «нечетких экстракторов» построена на том, что для обнаружения и устранения ошибок используются классические математические конструкции избыточных бинарных кодов.

Из теории известно, бинарные коды могут привить до 50% кодов. Однако таким конструкциям потребуется бесконечно большая избыточность. Естественно, что этот предельный режим на практике реализован быть не может. Для правки большого числа ошибок приходится использовать самокорректирующиеся коды с очень высокой избыточностью. Так, по данным Даугмана [8], после использования классического самокорректирующихся кодов реальная длина ключа аутентификации личности составляет 114 бит, т. е. при реализации своего «нечеткого экстрактора» Даугман использовал самокорректирующийся код с $2046/114 \approx 18$ -кратной избыточностью.

Для нас принципиально важно то, что при обосновании ожидаемой длины ключа «нечеткого экстрактора» в 114 бит был использован переход в пространство расстояний Хэмминга:

$$h = \sum_{i=1}^{2046} ("x_i") \oplus ("c_i"), \quad (2)$$

где $"x_i"$ – один из разрядов проверяемого входного кода «нечеткого экстрактора» Даугмана; $"c_i"$ – один из разрядов

«нечеткого контейнера», используемого для обнаружения и устранения ошибок в «сыром» коде.

Принципиальным шагом по упрощению вычислений является то, что в место анализа огромного числа состояний системы $N \approx 2^{2046}$ по формуле Шеннона (1) переход в пространство расстояний Хэмминга (2) экспоненциально снижает число, анализируемых состояний до величины $N = 2047$.

Следует обратить особое внимание на то, что технология «нечетких экстракторов» на текущий момент не получила широкого распространения. Проблема состоит в том, что она ориентирована на применение классических самокорректирующихся кодов с огромной 18-кратной избыточностью. Это приводит к снижению длины криптографического ключа в 18 раз по отношению к числу анализируемых биометрических параметров.

Так общедоступное приложение «БиоНейроАвтограф», анализирующее рукописный почерк, позволяет получать всего 416 биометрических параметров. Если применить технологию «нечетких экстракторов», то мы получим длину ключа $416/18 \approx 23$ бит. Еще хуже складывается ситуация при анализе «нечеткими экстракторами» голоса [9] и рисунков отпечатков пальца.

Нейросетевое обогащение биометрических данных перед их квантованием

Установлено, что технология «нечетких экстракторов» эффективно работает, когда биометрические данные «хорошего» качества и их много. Когда данных мало и они «среднего» качества,

требуется слишком большая кодовая избыточность, а стабильно повторяющиеся ключи оказываются короткими.

Выходом из этого тупика является предварительное нейросетевое обогащение сырых биометрических данных до уровня приемлемого подавления в них хаоса. При этом, какая технология нейросетевого обогащения данных используется, не имеет значения. Типов искусственных нейронов множество, они могут быть объединены в нейросети с различными архитектурами. Каждая нейросетевая архитектура применима, если она позволяет обогащать данные до приемлемого качества и обеспечить необходимый объем. Это могут быть как простейшие однослойные или двухслойные нейросети, автоматически обученные по ГОСТ Р 52633.5-2011, либо это могут быть заранее предобученные многослойные нейросети глубокого обучения [10], ориентированные на распознавание

лиц людей или перевода их голосового запроса в текстовый запрос [11].

Принципиально важным моментом является то, что в России введен стандарт по их тестированию на малых выборках ГОСТ Р 52633.3-2011. Он использует то, что в пространстве расстояний Хэмминга коды-отклики нейросети на образы «Чужой» имеют нормальное распределение. Это позволяет не ждать появления редких событий, как требует формула Шенна (1), а предсказывать вероятности появления редких событий [12] в пространстве расстояний Хемминга. То же самое выполняется и в пространстве коэффициентов корреляции двух сравниваемых между собой кодов [13].

В итоге удается экспоненциально сократить объем тестовых выборок при оценке энтропии криптографических ключей, например, длиной 256 бит. При этом шкала энтропии Хэмминга не совпадает со шкалой энтропии Шенна (рис. 1).

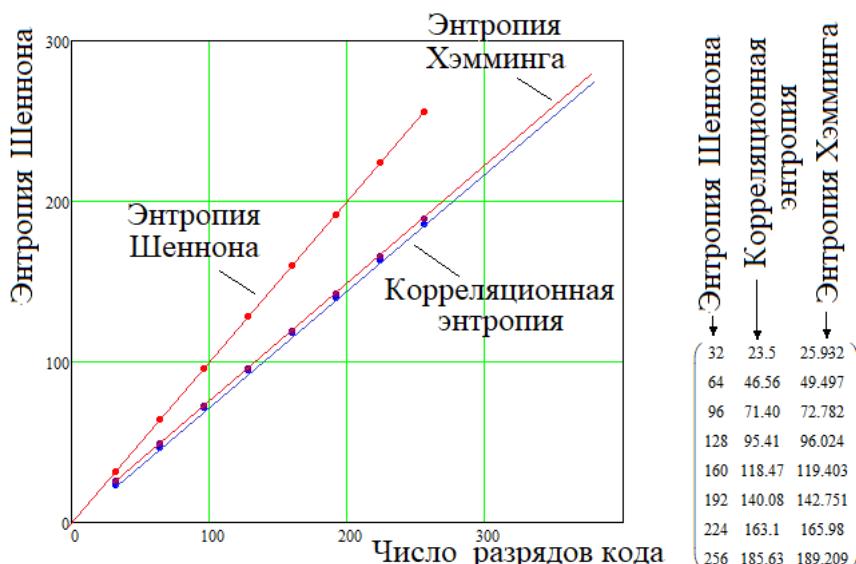


Рис. 1. Методические ошибки оценки энтропии по шкале Шенна при ее оценках в пространстве расстояний Хэмминга и в пространстве корреляционной энтропии

Fig. 1. Methodological errors in estimating entropy on the Shannon scale when estimating it in the space of Hamming distances and in the space of correlation entropy

Очевидно, что более простые в вычислительном отношении оценки энтропии Хэмминга могут быть пересчитаны в значения энтропии Шеннона [14] путем следующего преобразования:

$$H("x_1, x_2, \dots, x_N") \approx -0,41 + 1,377 \cdot X("x_1, x_2, \dots, x_N"), \quad (3)$$

где $X("x_1, \dots, x_N")$ – энтропия Хэмминга, вычисленная в рамках гипотезы нормального распределения расстояний Хэмминга для 32 случайно, выбранных из тестовой базы примеров биометрических образов «Чужой» по рекомендациям ГОСТ Р 52633.3-2011.

Параллельно с расстоянием Хэмминга энтропию можно оценивать через вычисление коэффициентов корреляции между кодами-откликами нейросети на образы «Чужой» [15]:

$$r \approx \text{corr}("x", "c") \approx \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{("x_i" - E("x")) \cdot ("c_i" - E("c"))}{\sigma("x") \cdot \sigma("c")}, \quad (3)$$

где $E(\cdot)$ – математическое ожидание анализируемых бинарных векторов; $\sigma(\cdot)$ – стандартное отклонение анализируемых бинарных векторов.

В первом приближении можно рассматривать энтропию Хэмминга и корреляционную энтропию как два эквивалента классический энтропии Шеннона (1) с полиномиальной вычислительной сложностью оценок.

Заметим, что для идеального генератора бинарного «белого» шума последовательности одинаковой длины N при вычислении функционала (4) всегда дают случайные блуждания вокруг

нулевого значения коэффициентов корреляции.

Коэффициенты корреляции, так же как расстояния Хэмминга, имеют нормальное распределение, т. е. оценить энтропию вполне возможно через предсказывание вероятности появления редких событий по данным распределения разных значений коэффициентов корреляции случайно выбранных 32 образов «Чужой». Шкала энтропии Шеннона и шкала корреляционной энтропии связаны линейно:

$$H("x_1, x_2, \dots, x_N") \approx -0,334 + 1,377 \times R("x_1, x_2, \dots, x_N"), \quad (5)$$

где $R("x_1, \dots, x_N")$ – корреляционная оценка энтропии.

При этом значения расстояний Хэмминга хорошо описываются законом биномиального распределения Бернулли, если стандартное отклонение расстояний Хэмминга интерпритировать как «среднегрупповую» неопределенного Гейзенберга для нескольких молекул (нескольких опытов малой выборки) [16]. Корреляционные расстояния появляются, если перейти от подбрасывания одной монеты по схеме Бернулли к подбрасыванию монет горстью [17].

Для корреляционных предсказаний вероятностей ошибок пока нет рекомендаций в форме национального стандарта по типу ГОСТ Р 52633.3-2011, будем надеяться, что он может появиться в силу линейной связи шкалы энтропии Шеннона со шкалой энтропии коэффициентов корреляции (4) (рис. 1).

Устранение случайности циклическими упорядочивающими перестановками состояний разрядов

Если мы хотим получить ключ длиной 256 бит, то нам потребуется обратиться к генератору псевдослучайных чисел. Далее необходимо выполнить квантование, присвоив состояние «0» отрицательным числам и состояние «1» положительным числам. При этом мы получим случайную бинарную последовательность. В первом приближении ее можно считать «белым» шумом.

Можно попытаться постепенно устранять из последовательности присутствие хаоса «белого» шума. Например, этого можно добиться, перегоняя нулевые состояния в начало последовательности, а единичные состояния в конец последовательности [18]. На рисунке 2 отображены первые три шага циклической перестановки состояний из начала последовательности в ее окончание.

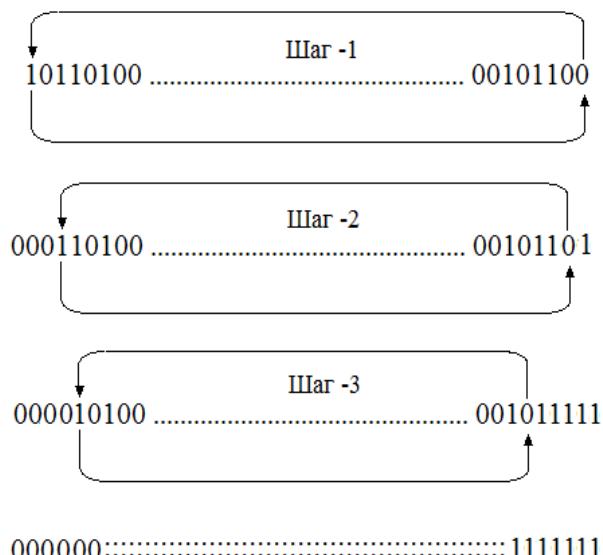


Рис. 2. Три первых шага циклических перестановок состояний «0» из начала в конец и последовательности с замещением их состояниями «1», первоначально расположенные в конце последовательности

Fig. 2. The first three steps of cyclic permutations of states "0" from the beginning to the end and the sequence with their replacement by states "1", initially located at the end of the sequence

На рисунке 2 видно, что начало последовательности состоит только из нулей «00000...», а конец последовательности состоит только из единиц «.....111111». При этом длина монотонных входных и выходных состояний

увеличиваются на каждом шаге алгоритма. На рисунке 3 представлена программа, реализованная на языке MathCAD, воспроизводящая соответствующий численный эксперимент, а также отражены его результаты.

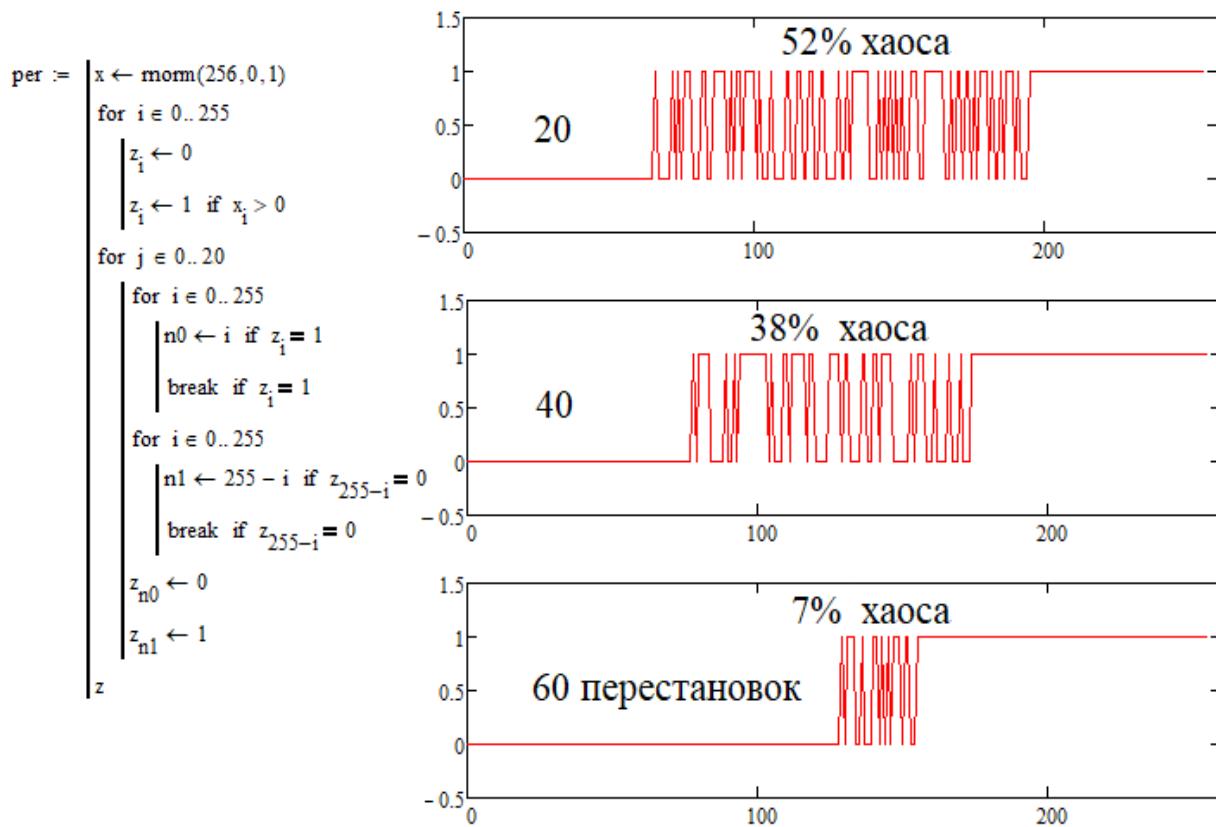


Рис. 3. Постепенное устранение хаоса из псевдослучайной бинарной последовательности через использование 20, 40, 60 кольцевых перестановок состояний «1»↔«0»

Fig. 3. Gradual elimination of chaos from a pseudo-random binary sequence through the use of 20, 40, 60 ring permutations of states "1"↔"0"

Из рисунка 3 видно, что по мере увеличения числа перестановок сжимается центральный интервал остаточного хаоса. Формально для любой бинарной последовательности можно вычислить, сколько потребуется перестановок для устранения некоторой изначально заданной части хаоса.

В нашем случае остаточная часть хаоса составляют 52%, 38%, 7% от его начального 100%-ного значения до запуска процедур упорядочивания. Предположительно число перестановок, требующееся для полного устранения хаоса, можно рассматривать как некоторую

метрику когнитивного пути нейросетевого противодействия хаосу. По крайней мере, такая интерпретация хорошо ложится на технологии биометрико-нейросетевой идентификации и аутентификации.

Результаты и их обсуждение

Рассмотренная выше метрика длины когнитивного пути дополняет ранее уже известные три метрики. Это хорошо иллюстрирует связь числа понижающих энтропию перестановок. Связь числа перестановок с метрикой расстояний Хэмминга отображена ниже (рис. 4).

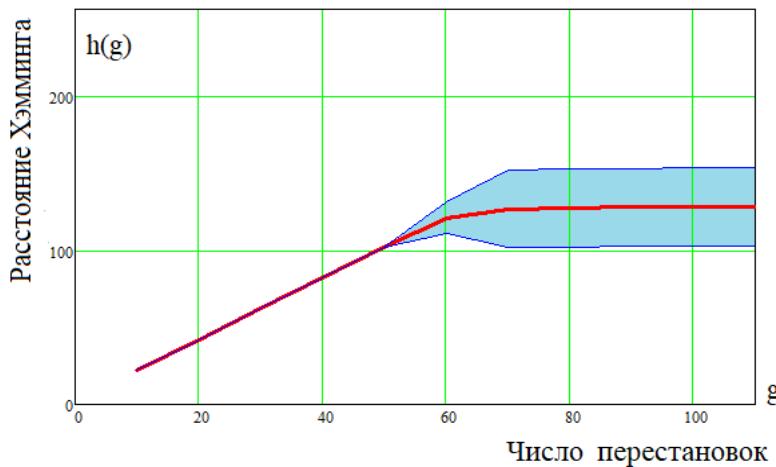


Рис. 4. Статистико-детерминированная связь метрики перестановок и метрики расстояний Хэмминга

Fig. 4. Statistically deterministic relationship between the permutation metric and the Hamming distance metric

Представленные на рисунке 4 данные получены в результате численного моделирования, построенного на программе, отображеной в левой части рисунка 3. Из рисунка 4 видно, что при применении до 50 перестановок новая метрика $-g$ линейно связана с метрикой расстояний Хэмминга. При большем числе перестановок связь с расстоянием Хэмминга становится статистической.

При этом математическое ожидание расстояний Хэмминга становится равным 128 бит, его стандартное отклонение монотонно увеличивается до значения в 8 бит.

Похожим соотношением метрика перестановок понижения энтропии $-g$ связана с метрикой корреляционных связей (рис. 5).

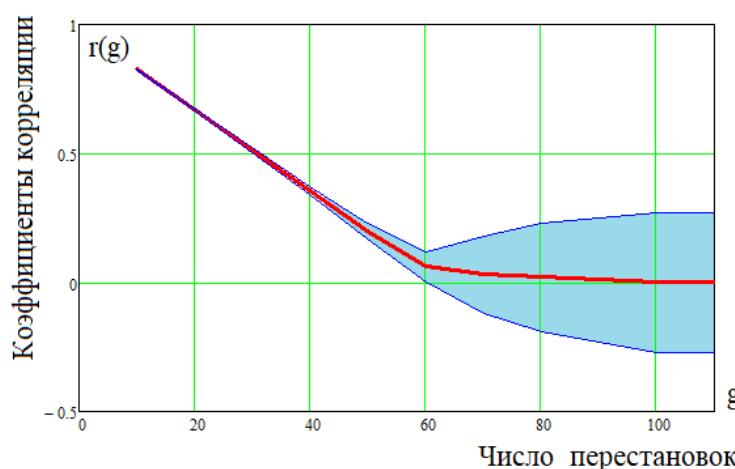


Рис. 5. Связь значений коэффициентов корреляции с числом перестановок $-g$, понижающих энтропию

Fig. 5. Relationship between the values of the correlation coefficients and the number of permutations $-g$ that reduce entropy

В интервале до 40 перестановок $-g$ их связь с коэффициентом корреляции является линейной и практически детерминированной. С ростом числа перестановок математическое ожидание значений коэффициентов корреляции приближается к нулевому значению. Стандартное отклонение монотонно увеличивается до значения $\sigma(r) \approx 0,0934$. Отмеченная затемненной заливкой площадь в правой части рисунка 5 соответствует режиму блужданий значений коэффициентов корреляции вокруг нулевого значения.

Скорее всего, может быть формализована связь, описывающая взаимное влияние метрики перестановок с метрикой Хэмминга и метрикой корреляционных связей. После формализации должна получиться система их двух уравнений. Появляется перспектива найти решение этой системы, дающее связи метрики перестановок с энтропией Шеннона. Тогда мы получим еще один эффективный алгоритм упрощенной оценки энтропии Шеннона, имеющий полиномиальную вычислительную сложность. Еще одним способом получить связь шкалы энтропии Шеннона с энтропией перестановок является имитационное моделирование. По крайней мере, это направление исследований технически реализуемо для коротких случайных последовательностей длиной до 32 бит.

Тем не менее вполне возможны простые процедуры связывания шкалы энтропии перестановок и шкалы энтропии

Шеннона для кода длиной 256 бит. Промежуточные частные энтропии Шеннона, полученные для разных значений метрики $-g$, могут быть оценены в первом приближении следующим соотношением:

$$H(g) \approx \frac{n_{\text{хаос}}}{n_0 + n_{\text{хаос}} + n_1} \approx \frac{n_{\text{хаос}}}{256}, \quad (6)$$

где $n_{\text{хаос}}$ – число изменяющихся разрядов остаточного хаоса, возникающих после применения g -шагов упорядочивания (рис. 3) в центре частично упорядоченной последовательности; n_0 – длина начального фрагмента монотонной последовательности, состоящего только из состояний «0»; n_1 – длина заключительной монотонной последовательности, состоящей только из «1».

Последнее означает, что для любой бинарной последовательности мы можем задать сетку числа перестановок $\{g_1, g_2, \dots, g_k\}$ и получить вектор-откликов оценок энтропии Шеннона $H(g_1), H(g_2), \dots, H(g_k)$ по формуле (6). Далее следует воспользоваться данным численных экспериментов, например, через обучение нейросети связывающей шкалу энтропии перестановок и классическую шкалу энтропии Шеннона.

Энтропия Хэмминга и энтропия корреляционных связей сами по себе дают для одной бинарной последовательности только два значения показателя: $\{X(\langle.\rangle), R(\langle.\rangle)\}$. Когнитивная метрика в тех же условиях дает возможность получить вектор показателей $\{H(g_1), H(g_2), \dots, H(g_k)\}$ монотонно

понижающейся энтропии. Более того, опираясь на концепцию постепенного снижения уровня энтропии или повышения уровня когнитивности для сетки перестановок $\{g_1, g_2, \dots, g_k\}$, мы можем получить вектор откликов расстояний Хэмминга $\{h(g_1), h(g_2), \dots, h(g_k)\}$ и вектор откликов показателей корреляционной сцепленности $\{r(g_1), r(g_2), \dots, r(g_k)\}$. Формально привлечением двух когнитивной метрики удается увеличить число анализируемых параметров в $2k$ раз. Такое повышение длины вектора учитываемых данных должно приводить к повышению точность оценки энтропии. Однако такое повышение достоверности должно присутствовать.

Видимо, снижение энтропии данных – это объективное свойство естественных нейронных сетей живых существ и всех нейросетевых приложений искусственного интеллекта. Уровень когнитивности, скорее всего, является дополнением ее противоположности – энтропии или уровня хаоса. Основное

свойство нейронных сетей (естественных и искусственных), видимо, связано с их потенциальной возможностью за счет своих собственных когнитивных свойств снижать уровень хаоса (уровень энтропии «белого» шума) на фоне легко формализуемых классической математикой детерминированных компонент.

Выводы

Предложенная метрика длины когнитивного пути, видимо, должна иметь свою собственную энтропийную шкалу, не совпадающую со шкалой энтропии Шеннона. Все это следует рассматривать как удобный для практического применения частный случай некоторой упрощенной оценки сложной в вычислительном отношении задачи. По крайней мере, приведенную в статье программу можно рассматривать как еще одну систему тестов качества криптографического ключа, имеющую полиномиальную вычислительную сложность.

Список литературы

1. A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications, Special Publication (NIST SP) / L. Bassham, A. Rukhin, J. Soto [et al.]. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=906762 (дата обращения: 11.09.2025).
2. Zubkov A. M., Serov A. A. Testing the NIST Statistical Test Suite on artificial pseudorandom sequences // Математические вопросы криптографии. 2019. № 10(2). С. 89–96.
3. Зубков А. М. Энтропия как характеристика качества случайных последовательностей // Математические вопросы криптографии. 2021. № 12(3). С. 31–48.
4. Иванов А. И., Чернов П. А. Протоколы биометрико-криптографического рукопожатия: защита распределенного искусственного интеллекта Интернет вещей нейросетевыми методами // Системы безопасности. 2018. № 6 (144). С. 54–59.

5. Bogdanov D. S., Mironkin V. O. Data recovering for a neural network-based biometric authentication scheme // Математические вопросы криптографии. 2019. № 10(2). С. 61–74.
6. Rane S. Standardization of Biometric Template Protection // IEEE MultiMedia. 2014. Vol. 21, N 4. P. 94–99.
7. Иванов А. И., Иванов А. П., Юнин А. П. Устранение методической погрешности оценки энтропии в пространстве расстояний Хэмминга // Защита информации. Инсайд. 2023. № 6(114). С. 55–59.
8. Feng Hao, Anderson R., Daugman J. Combining crypto with biometrics effectively // IEEE Transactions on Computers. 2006. Vol. 55, N 9. P. 1084–1088.
9. Nandakumar K., Jain A. K. Biometric Template Protection: Bridging the performance gap between theory and practice // IEEE Signal Processing Magazine. 2015. Vol. 32, is. 5. P. 88–100. <https://doi.org/10.1109/MSP.2015.2427849>
10. Николенко С., Кудрин А., Архангельская Е. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб.: Питер, 2018. 480 с.
11. Мэн Цзянь, Яо Лусин. DeepSeek на практике / перевод с китайского И. А. Шевкуна. М.: ДМК Пресс, 2025. 206 с.
12. Волчихин В. И., Иванов А. И., Иванов А. П. Алгоритмы быстрого вычисления энтропии Шеннона на малых выборках для длинных кодов с существенно зависимыми разрядами // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 4. С. 27–34. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-4-27-34>
13. Иванов А. И. Корреляционная энтропия как метрика абсолютного хаоса либо его противоположности в форме абсолютного порядка // Системы безопасности. 2025. № 4. С. 130–133.
14. Иванов А. И., Иванов А. П., Горбунов К. А. Нейросетевое преобразование биометрии в код аутентификации: дополнение энтропии Хэмминга энтропией корреляционных связей между разрядами // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1(41). С. 91–98.
15. Нейросетевой анализ малых выборок с использованием большого числа статистических критериев для проверки последовательности гипотез о значении математических ожиданий коэффициентов корреляции / А. И. Иванов, А. И. Годунов, Е. А. Малыгина, Н. А. Папуша, А. И. Ермакова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 37–46. <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2024-3-4>
16. Иванов А. И. Квантовая неопределенность Гейзенберга для «средне-групповой» скорости математических молекул // Защита информации. Инсайд. 2024. № 6(120). С. 58–92.
17. Иванов А. И. Появление взаимной корреляции состояний 256 монет Бернулли при их параллельном подбрасывании горстью // Защита информации. Инсайд. 2025. № 4. С. 82–86.

18. Иванов А. И. Энтропия как оценка числа модификации кода от исходного хаоса к максимальному порядку: быстрый алгоритм приближенной оценки качества случайных последовательностей // Защита информации. Инсайд. 2024. № 4(118). С. 56–59.

References

1. Bassham L., Rukhin A., Soto J., et al. A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications, Special Publication (NIST SP). Available at: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=906762 (accessed 11.09.2025).
2. Zubkov A.M., Serov A.A. Testing the NIST Statistical Test Suite on artificial pseudorandom sequences. *Matematicheskie voprosy kriptografii = Mathematical Issues of Cryptography*. 2019;(10):89–96. (In Russ.)
3. Zubkov A.M. Entropy as a characteristic of the quality of random sequences. *Matematicheskie voprosy kriptografii = Mathematical Issues of Cryptography*. 2021;(12):31–48.
4. Ivanov A.I., Chernov P.A. Protocols of biometric and cryptographic handshake: protection of distributed artificial intelligence of the Internet of Things by neural network methods. *Sistemy bezopasnosti = Security Systems*. 2018;(6):54–59. (In Russ.)
5. Bogdanov D.S., Mironkin V.O. Data recovery for a neural network-based bio-metric authentication scheme. *Matematicheskie voprosy kriptografii = Mathematical Issues of Cryptography*. 2019;(10):61–74.
6. Rane S. Standardization of Biometric Template Protection. *IEEE MultiMedia*. 2014;21(4):94–99.
7. Ivanov A.I., Ivanov A.P., Yunin A.P. Elimination of methodological errors in estimating entropy in the space of Hamming distances. *Zashchita informatsii. Insaid = Information Protection. Inside*. 2023;(6):55–59. (In Russ.)
8. Feng Hao, Anderson R., Daugman J. Combining crypto with biometrics effectively. *IEEE Transactions on Computers*. 2006;55(9):1084–1088.
9. Nandakumar K., Jain A. K. Biometric Template Protection: Bridging the performance gap between theory and practice. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2015;32:88–100. <https://doi.org/10.1109/MSP.2015.2427849>
10. Nikolenko S., Kudrin A., Arkhangelskaya E. Deep learning. Immersion in the world of neural networks. Saint Petersburg: Piter; 2018. 480 p. (In Russ.)
11. Meng Jian, Yao Luxing. DeepSeek in practice. Moscow: DMK Press; 2025. 206 p. (In Russ.)
12. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Ivanov A.P. Algorithms for fast calculation of Shannon entropy on small samples for long codes with significantly different digits. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Bulletin of the Astrakhan State Technical*

University. Series: *Management, Computer Engineering and Computer Science.* 2024;(4):27–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-4-27-34>

13. Ivanov A.I. Correlation entropy as a metric of absolute chaos or its opposite in the form of absolute order. *Sistemy bezopasnosti = Security Systems.* 2025;(4):130–133. (In Russ.)

14. Ivanov A.I., Ivanov A.P., Gorbunov K.A. Neural network transformation of biometrics into an authentication code: addition of Hamming entropy by entropy of relational connections between bits. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and Quality of Complex Systems.* 2023;(1):91–98. (In Russ.)

15. Ivanov A.I., Godonov A.I., Malygina E.A., Papusha N.A., Ermakova A.I. Neural network analysis of small samples using a large number of statistical criteria to test the sequence of hypotheses about the value of mathematical expectations of correlation coefficients. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Higher Educational Institutions. The Volga Region. Technical Sciences.* 2024;(3):37–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2024-3-4>

16. Ivanov A.I. Heisenberg's quantum uncertainty for the "medium-group" velocity of mathematical molecules. *Zashchita informatsii Insaid = Information Protection. The Inside View.* 2024;(6):58–92. (In Russ.)

17. Ivanov A.I. The appearance of a mutual correlation of the states of 256 Ber-zero coins when they are tossed in parallel by a handful. *Zashchita informatsii Insaid = Information Protection. The Inside View.* 2025;(4):82–86. (In Russ.)

18. Ivanov A.I. Entropy as an estimate of the number of code modifications from initial chaos to maximum order: a fast algorithm for approximate estimation of the quality of random sequences. *Zashchita informatsii Insaid = Information Protection. The Inside View.* 2024;(4):56–59. (In Russ.)

Информация об авторе / Information about the Author

Иванов Александр Иванович,
доктор технических наук, профессор,
научный консультант, Пензенский
научно-исследовательский
электротехнический институт,
г. Пенза, Российская Федерация,
e-mail: bio.ivan.penza@mail.ru
SPIN: 2277-7744,
ORCID: 0000-0003-3475-2182,
Author ID: 744989

Alexander I. Ivanov, Doctor of Sciences
(Engineering), Professor, Scientific Consultant,
Penza Research Institute of Electrical
Engineering, Penza, Russian Federation,
e-mail: bio.ivan.penza@mail.ru,
SPIN: 2277-7744,
ORCID: 0000-0003-3475-2182,
Author ID: 744989

Проектирование ядра информационной системы на основе workflow-движка

А. А. Пинаев¹✉, Р. А. Томакова¹, Д. К. Реутов¹, Д. А. Фомин¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: a59-info@yandex.ru

Резюме

Цель исследования заключается в разработке архитектуры ядра информационной системы, выполненной на основе open-source workflow-движка Elsa Workflows, ориентированной на автоматизацию бизнес-процессов на предприятиях малого и среднего бизнеса. Особое внимание уделено созданию гибкой, масштабируемой и экономически эффективной информационной системы.

Методы. В работе использованы методы системного анализа для проведения сравнительного анализа существующих решений, таких как Camunda, ELMA BPM. Сформулированы и обоснованы функциональные и нефункциональные требования, предъявляемые к информационной системе. Разработан алгоритм функционирования ядра, реализован прототип архитектуры с использованием технологий .NET, PostgreSQL и React. Осуществлено имитационное моделирование, проведены эксперименты.

Результаты. Предложена модульная архитектура системы, включающая подсистемы управления задачами, мониторинга, уведомлений, интеграции и аналитики. Elsa Workflows представляет собой легковесный, модульный и свободно распространяемый движок для платформы .NET. Его ключевые особенности заключаются в поддержке кодовой и декларативной реализации процессов, визуального редактора, встроенной поддержки REST API и микросервисной архитектуры. Особое внимание уделено гибкости определения процессов: они могут быть выполнены как на C# (code-first подход), так и в декларативном виде – через JSON или YAML. Реализована схема алгоритма функционирования жизненного цикла задачи с механизмами обработки ошибок, возможностями постобработки и архивации информации. Доказана возможность создания эффективного workflow-ядра на платформе .NET, отличающаяся низкой стоимостью владения и высокой степенью адаптивности.

Заключение. Использование open-source workflow-движка Elsa Workflows позволяет создать современное ядро информационной системы, сочетающее гибкость, производительность и соответствие требованиям импортозамещения. Предложенное решение может служить основой для цифровизации слабо автоматизированных производств и способствовать повышению операционной эффективности предприятий.

Ключевые слова: движок; информационная система; производственная система; автоматизация процессов.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Проектирование ядра информационной системы на основе workflow-движка / А. А. Пинаев, Р. А. Томакова, Д. К. Реутов, Д. А. Фомин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 4. С. 22–34. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-22-34>

Поступила в редакцию 16.10.2025

Подписана в печать 14.11.2025

Опубликована 26.12.2025

Designing the core of an information system based on a workflow engine: a comparative analysis of approaches

Aleksandr A. Pinaev¹✉, Rimma A. Tomakova¹,
Dmitry K. Reutov¹, Dmitry A. Fomin¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: a59-info@yandex.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop the core architecture of an information system based on the open-source workflow engine Elsa Workflows, focused on the automation of business processes in small and medium-sized businesses. Special attention is paid to the creation of a flexible, scalable and cost-effective information system.

Methods. The paper uses system analysis methods to conduct a comparative analysis of existing solutions such as Camunda, ELMA BPM. The functional and non-functional requirements for the information system are formulated and substantiated. An algorithm for the functioning of the core has been developed, and a prototype architecture using technology has been implemented.NET, PostgreSQL, and React. Simulation modeling was carried out, experiments were conducted.

Results. A modular system architecture is proposed, including subsystems for task management, monitoring, notifications, integration, and analytics. Elsa Workflows is a lightweight, modular and freely distributed engine for the .NET platform. Its key features are support for code and declarative implementation of processes, visual editing, built-in support for REST API and microservice architecture. Special attention is paid to the flexibility of defining processes: they can be executed both in C# (code-first approach), and in a declarative form – via JSON or YAML. The scheme of the algorithm for the functioning of the task's life cycle with error handling mechanisms, post-processing and information archiving capabilities is implemented. The possibility of creating an effective workflow core on the platform has been proven.NET, characterized by a low cost of ownership and a high degree of adaptability.

Conclusion. Using the Elsa Workflows open-source workflow engine allows you to create a modern information system core that combines flexibility, productivity, and compliance with import substitution requirements. The proposed solution can serve as a basis for digitalization of poorly automated industries and contribute to improving the operational efficiency of enterprises.

Keywords: engine; information system; production system; process automation.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Pinaev A.A., Tomakova R.A., Reutov D.K., Fomin D.A. Designing the core of an information system based on a workflow engine: a comparative analysis of approaches. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2025;15(4):22–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-22-34>

Received 16.10.2025

Accepted 14.11.2025

Published 26.12.2025

Введение

Цифровизация промышленности требует не только внедрения новых технологий, но и переосмысления подходов к управлению производственными

процессами. На предприятиях с разрозненной ИТ-инфраструктурой процессы часто выполняются частично вручную, что приводит к задержкам, ошибкам и отсутствию прозрачности исполнения [1].

Одним из наиболее эффективных способов повышения управляемости и автоматизации является применение workflow-подхода, при котором бизнес-процессы моделируются, исполняются и контролируются централизованно. Ядром такой системы становится workflow-движок – программный компонент, отвечающий за координацию шагов, управление состоянием, контроль сроков и взаимодействие с пользователями и внешними системами [2].

Среди существующих решений выделяется Camunda – мощная и широко используемая платформа, основанная на стандарте BPMN 2.0. Она активно применяется в крупных корпорациях благодаря своей зрелости, поддержке сложных сценариев и развитой экосистемы. Однако её использование связано с рядом ограничений: высокая стоимость лицензирования, сложность настройки и зависимость от Java-экосистемы [3].

В этих условиях особую актуальность приобретают open-source альтернативы, совместимые с современными стеками разработки и адаптированные к требованиям российского рынка. Одним из таких решений является Elsa Workflows – легковесный, модульный и свободно распространяемый движок для платформы .NET. Его ключевые особенности: поддержка кодовой и декларативной реализации процессов, визуальный редактор, встроенная поддержка REST API и микросервисной архитектуры [4].

Цель данной статьи – продемонстрировать возможность использования Elsa Workflows в качестве ядра информационной системы, проанализировать его функциональные возможности, сравнить с Camunda и предложить архитектуру системы, ориентированную на предприятия малого и среднего бизнеса.

Материалы и методы

Анализ существующих решений и выбор архитектурного подхода

В современной IT-экосистеме автоматизация бизнес-процессов вышла на первый план как ключевой элемент цифровой трансформации предприятий [1]. На рынке представлено множество решений (от мощных корпоративных платформ до легковесных open-source движков). Однако выбор подходящего workflow-движка требует тщательного анализа не только функциональных возможностей, но и таких факторов, как стоимость владения, сложность внедрения, масштабируемость и соответствие стратегии развития компании [2].

Одним из наиболее зрелых и признанных в индустрии решений является Camunda Platform. Эта система, построенная на стандарте BPMN 2.0, зарекомендовала себя как надёжное ядро для управления сложными бизнес-процессами в крупных организациях. Её архитектура позволяет моделировать процессы высокой степени детализации, поддерживает широкий спектр шлюзов, условных ветвлений, параллельных потоков и событий. Интеграция с Java-экосистемой (Spring Boot, Jakarta EE) делает её естественным выбором для enterprise-приложений. Кроме того, Camunda предлагает развитый веб-интерфейс (Cockpit), обеспечивающий мониторинг выполнения процессов, анализ производительности и диагностику ошибок [4].

Несмотря на свои сильные стороны, Camunda имеет ряд существенных ограничений. Во-первых, лицензирование коммерческих версий может быть дорогостоящим, особенно для малых и средних предприятий [5]. Во-вторых, система обладает значительной

сложностью, что требует привлечения квалифицированных специалистов как на этапе внедрения, так и в процессе сопровождения [6]. В-третьих, зависимость от JVM (Java Virtual Machine) может создавать проблемы для организаций, чья ИТ-инфраструктура основана на экосистеме Microsoft. Эти факторы делают Camunda менее доступным решением для компаний, стремящихся к быстрой и экономичной цифровизации без привязки к дорогому лицензионному ПО [7].

На фоне доминирования Java-решений всё большую популярность приобретают open-source альтернативы, ориентированные на другие технологические стеки. Одним из наиболее перспективных проектов в .NET-экосистеме является Elsa Workflows, который позиционируется как «легкий и гибкий workflow-движок для платформы .NET», что напрямую соответствует запросам на гибкость и низкий порог входа [8]. В отличие от Camunda, Elsa не стремится охватить весь стандарт BPMN, а фокусируется на предоставлении достаточного набора примитивов для реализации типовых сценариев: последовательные и параллельные задачи, условия, пользовательские действия, HTTP-вызовы, таймеры и события [9].

Архитектурно Elsa Workflows отличается модульностью и лёгкостью интеграции. Будучи построенной на ASP.NET Core, она бесшовно встраивается в современные .NET-приложения, использует встроенную систему DI (Dependency Injection) и совместима с Entity Framework Core для хранения состояний процессов [10]. Это позволяет разработчикам быстро разворачивать ядро workflow-системы без необходи-

мости настройки сложной внешней инфраструктуры. Особое внимание уделено гибкости определения процессов: они могут быть описаны как на C# (code-first подход), так и в декларативном виде – через JSON или YAML. Такой двойственный подход открывает возможности как для разработчиков, так и для low-code сценариев, где бизнес-аналитики могут редактировать процессы через визуальный редактор [11].

Сравнительный анализ показывает, что Elsa Workflows не конкурирует с Camunda напрямую, а занимает свою нишу – гибкие, недорогие и быстро разворачиваемые решения для МСП и внутренних систем корпораций [12]. Тогда как Camunda применима для масштабных проектов, Elsa подходит для быстрого решения конкретных задач. Например, автоматизация согласования заявок, управление жизненным циклом документов или координация действий в рамках микросервисной архитектуры [13].

В условиях, когда в России усиливается тренд на импортозамещение и развитие собственных ИТ-решений, open-source проекты на базе .NET становятся особенно привлекательными. Они позволяют компаниям снизить зависимость от иностранных вендоров, обеспечить полный контроль над исходным кодом и адаптировать систему под специфические требования [14]. Именно в этом контексте использование Elsa Workflows как ядра информационной системы приобретает особую актуальность. Она сочетает в себе преимущества современной .NET-платформы, открытости и простоты, предлагая достойную альтернативу коммерческим аналогам [15].

Архитектура системы на основе Elsa Workflows

При проектировании информационной системы, основанной на workflow-движке, ключевым элементом является выбор архитектурного подхода, который обеспечивает не только функциональную полноту, но и такие критически важные качества, как гибкость, масштабируемость, безопасность и простота сопровождения. В рамках данного исследования предлагается архитектура, в которой Elsa Workflows выступает в роли центрального координатора бизнес-процессов, интегрированного в современную .NET-платформу. Такой подход позволяет реализовать ядро системы, предназначенное для эффективного управления жизненным циклом задач, координации взаимодействия между подразделениями с целью обеспечения сбора данных для последующего анализа.

1. Бэкенд (ASP.NET Core Web API). Система строится на модульной архитектуре, где каждый компонент отвечает за свою функциональную область, что соответствует принципам микросервисного подхода и облегчает дальнейшее масштабирование. Основу системы составляет ASP.NET Core Web API, выполняющий роль бэкенда и обеспечивающий взаимодействие с клиентскими приложениями через RESTful интерфейсы. Именно здесь размещается движок Elsa Workflows, интегрированный как часть хост-приложения [16]. Благодаря встроенной системе Dependency Injection и middleware-механизмам ASP.NET Core, Elsa получает доступ ко всем необходимым сервисам: базе данных, системе

логирования, аутентификации и внешним API [17].

2. Elsa Workflows Engine. Центральным элементом архитектуры является сам workflow-движок, реализованный на основе Elsa Core. Он отвечает за загрузку, выполнение и контроль состояния процессов, а также за управление переходами между шагами (активностями). Каждый процесс представляет собой формализованную последовательность действий, которая может включать пользовательские задачи, автоматические вызовы внешних сервисов, условия ветвления и таймеры. Одним из ключевых преимуществ Elsa является возможность определять процессы двумя способами: программно, на языке C#, или декларативно – через JSON или YAML. Это делает систему универсальной: разработчики могут использовать code-first подход для создания сложных логик, тогда как бизнес-аналитики могут редактировать процессы через визуальный редактор без необходимости вносить изменения в код [1].

Программная реализация процесса на C# обеспечивает высокую степень типобезопасности и удобства разработки. Процесс описывается как класс, реализующий интерфейс IWorkflow, а его структура строится с помощью fluent-синтаксиса. Например, процесс согласования заявки может начинаться с логирования события, затем переходить к пользовательской задаче, назначенному конкретному сотруднику, и завершаться HTTP-запросом к ERP-системе [4].

Рассмотрим схему алгоритма работы ядра информационной системы (рис. 1).

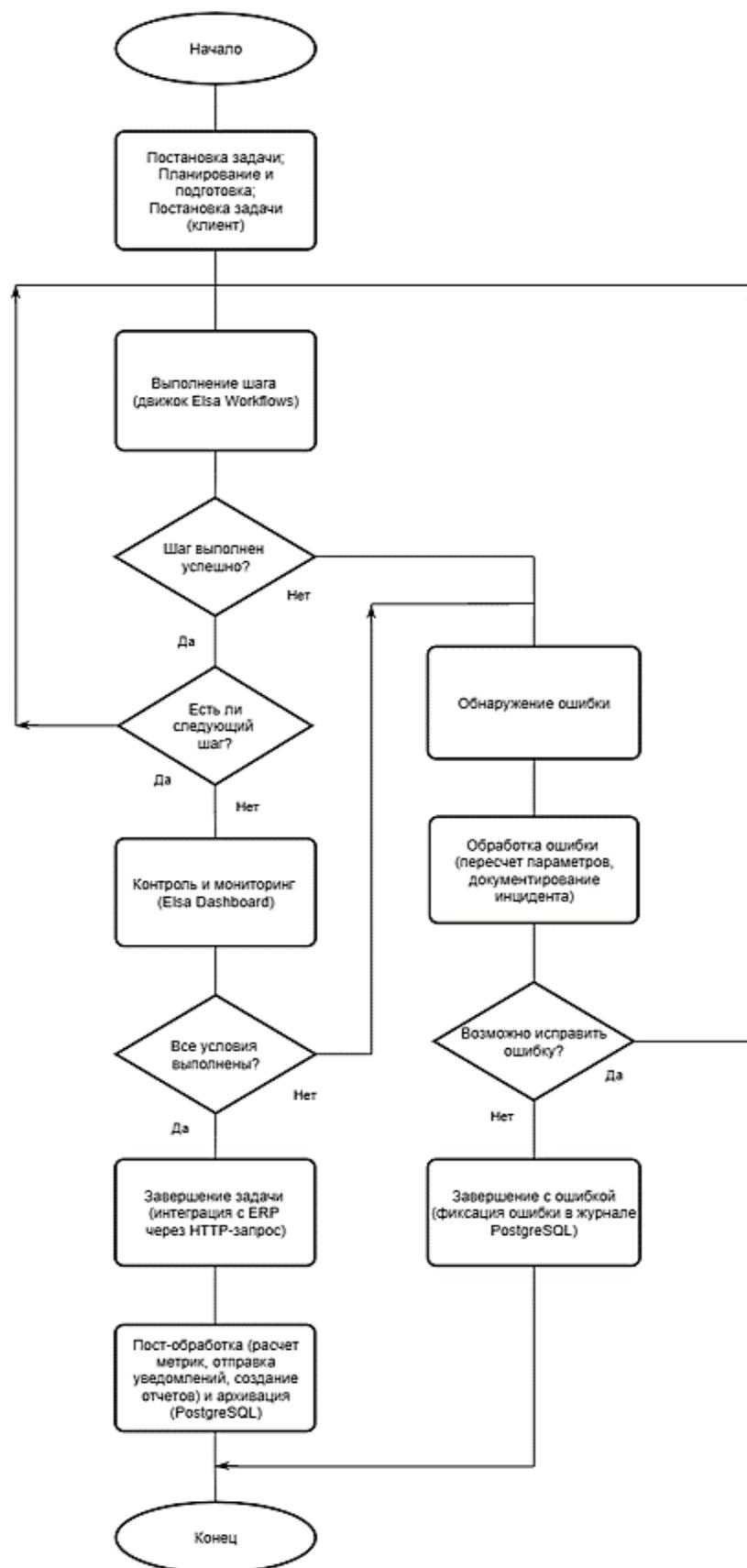


Рис. 1. Схема алгоритма работы ядра информационной системы

Fig. 1. Block diagram of the algorithm for the core operation of the information system

Все этапы контролируются движком, который сохраняет состояние процесса между шагами и гарантирует надежное выполнение даже в случае сбоев. При этом каждая активность может быть расширена через механизмы событий, позволяя добавлять кастомную логику (например, отправку уведомления или запись в журнал) [5].

Декларативный подход, основанный на JSON, особенно ценен в условиях low-code среды. Определение процесса представляется в виде структурированного документа, содержащего список активностей, их параметры и связи. Такой формат легко сериализуется, хранится в базе данных или файловой системе и может быть изменён без пересборки приложения. Это открывает возможности для динамического управления процессами, включая версионирование, тестирование A/B и быстрое реагирование на изменения в бизнес-логике. Кроме того, JSON-описания можно редактировать в веб-интерфейсе Elsa Studio, что делает систему доступной для нетехнических пользователей.

3. Фронтенд (Blazor / React). Фронтенд системы реализуется как одностраничное приложение (SPA), которое может быть построено на различных технологиях в зависимости от требований. В качестве одного из вариантов рассматривается использование React, который позволяет реализовать компонентную архитектуру, где каждый элемент UI – от списка задач до формы согласования – является независимым модулем. Через

библиотеку axios или fetch фронтенд взаимодействует с бэкенд-частью, получая данные о текущих задачах, процессах и уведомлениях. Однако, учитывая, что вся система построена на .NET, альтернативным решением может стать Blazor WebAssembly, позволяющий писать фронтенд на C# и использовать единый язык программирования на всех уровнях. Выбор между React и Blazor [15] зависит от стратегии развития компании, наличия команды разработчиков и требований к производительности [18].

4. Система управления базами данных (PostgreSQL). Хранение данных осуществляется с использованием реляционной базы данных, такой как PostgreSQL или SQL Server, через Entity Framework Core. В базе хранятся не только метаданные о пользователях, задачах и правах доступа, но и полная история выполнения процессов: экземпляры workflow, их состояние, журналы выполнения активностей и временные метки. Это обеспечивает прозрачность и возможность аудита, что особенно важно для корпоративных систем [19]. Архитектура persistence-слоя Elsa позволяет легко переключаться между различными провайдерами, что повышает гибкость и адаптивность системы к разным окружениям [20].

5. Elsa Dashboard. Важной частью архитектуры является Elsa Dashboard – веб-интерфейс, предназначенный для администрирования и мониторинга процессов. Через него можно просматривать список определений и запущенных

экземпляров, редактировать процессы, запускать их вручную и анализировать ошибки. Этот инструмент особенно полезен на этапах разработки и тестирования, а также для технической поддержки.

Особое внимание уделяется безопасности и контролю доступа. Система использует механизм аутентификации на основе JWT-токенов, интегрированный в ASP.NET Core Identity. Авторизация реализована по принципу RBAC (Role-Based Access Control), где каждому пользователю назначается одна или несколько ролей, определяющих его права. Например, исполнитель может видеть только свои задачи, менеджер – все задачи своего подразделения, а администратор – имеет полный доступ. Все действия в системе логируются, что позволяет вести учёт изменений и оперативно реагировать на инциденты.

Интеграция с внешними системами обеспечивается через HTTP-активности, очереди сообщений (например, RabbitMQ) и фоновые службы. Это позволяет организовать взаимодействие с ERP, CRM, почтовыми серверами и IoT-устройствами. Например, после завершения процесса система может автоматически отправить документ в 1С, уведомить

ответственного через Telegram или запустить обработку данных в аналитической платформе. Такой подход превращает workflow-движок в центральную шину интеграции, объединяющую разрозненные системы в единое информационное пространство [10].

Таким образом, предложенная архитектура представляет собой сбалансированное решение, сочетающее в себе мощь .NET-платформы, открытость и гибкость open-source проекта Elsa Workflows, а также современные подходы к разработке программного обеспечения [12]. Она ориентирована на предприятия малого и среднего бизнеса, нуждающиеся в экономичных, быстро внедряемых и легко настраиваемых системах автоматизации. В отличие от традиционных решений, таких как Camunda, данная архитектура не требует значительных затрат на лицензирование и консалтинг, что делает её особенно актуальной в условиях импортозамещения и цифровой трансформации российских предприятий.

Результаты и их обсуждение

Приведем в качестве примера фрагмент реализации процесса «Согласование заявки» на языке C#:

```
public class ApprovalWorkflow : IWorkflow
{
    public void Build(IWorkflowBuilder builder)
    {
        builder
            .StartWith<LogMessage>(x => x.Message = "Начало процесса")
```

```

.Then<UserTask>(
    x => x.Description = "Согласовать заявку",
    x => x.Users = new[] { "manager@company.ru" }
)
.Then<HttpRequestTask>(
    x => x.Method = HttpMethod.Post,
    x => x.Url = "https://erp/api/tasks/approve"
)
.Then<LogMessage>(x => x.Message = "Задача согласована");
}
}

```

Преимущества предлагаемого решения

Предложенная архитектура информационной системы, построенная на основе open-source workflow-движка Elsa Workflows и платформы .NET, демонстрирует высокую степень соответствия современным требованиям к цифровизации промышленных предприятий. Её ключевые достоинства заключаются не только в технической реализации, но и в стратегической значимости для малых и средних компаний, стремящихся к эффективной автоматизации без чрезмерных затрат и зависимости от внешних вендоров.

Одним из наиболее существенных преимуществ предлагаемой системы является её гибкость и адаптивность. В отличие от монолитных решений, таких как ELMA или Camunda, которые требуют длительного внедрения и дорогостоящей кастомизации, архитектура на базе Elsa позволяет быстро разворачивать новые процессы и оперативно реагировать на изменения в бизнес-логике. Это особенно важно для слабо автоматизированных производств, где процессы часто изменяются под влиянием внешних факторов: колебаний спроса,

обновления нормативной базы или реорганизации подразделений. Возможность описывать процессы как программным кодом на C#, так и в декларативном виде через JSON открывает доступ к управлению системой как для профессиональных разработчиков, так и для бизнес-аналитиков, что способствует формированию культуры low-code внутри организации.

Высокая производительность и надёжность достигаются за счёт использования современной экосистемы .NET. Язык C# и фреймворк ASP.NET Core обеспечивают типобезопасность, высокую скорость выполнения и встроенную поддержку асинхронных операций, что критически важно при работе с большим объёмом параллельных задач. Интеграция с Entity Framework Core и реляционными базами данных, такими как PostgreSQL или SQL Server, гарантирует сохранность состояния процессов даже в случае сбоев. Механизмы persistence и recovery, встроенные в сам движок Elsa, позволяют возобновлять выполнение процессов после перезапуска сервера, обеспечивая непрерывность работы системы.

Отмеченные выше преимущества способствуют тому, что решение

является пригодным для использования в условиях, где недопустимы простоя и потеря данных.

Особое внимание уделено безопасности и контролю доступа. Система использует современные подходы к аутентификации и авторизации, включая JWT-токены и ролевую модель (RBAC), что позволяет гибко управлять правами пользователей. Каждый сотрудник получает доступ только к тем задачам и данным, которые соответствуют его должности и зоне ответственности. Все действия в системе детально логируются, что обеспечивает прозрачность исполнения и возможность проведения аудита. Эта функциональность особенно предпочтительна для предприятий, работающих в регулируемых сферах, где требуется документирование всех этапов управления процессами.

С точки зрения экономической эффективности предлагаемое решение обладает существенно более низкой стоимостью по сравнению с коммерческими аналогами. Отсутствие лицензионных отчислений, открытость исходного кода и минимальные требования к инфраструктуре позволяют внедрять систему даже на предприятиях с ограниченным ИТ-бюджетом.

Стоит особо отметить, что при этом качество реализации не уступает зарубежным продуктам: модульная архитектура, поддержка микросервисов и веб-API обеспечивают масштабируемость и долгосрочную поддержку. Это делает систему не просто временным решением, а основой для построения единого информационного пространства, способного развиваться вместе с предприятием.

Не менее важным является соответствие политике импортозамещения ПО, проводимой правительством нашей страны. В текущих условиях стремление к технологической независимости становится одним из приоритетов государственной политики и корпоративных стратегий. Использование open-source проекта на базе .NET, который может быть свободно модифицирован, адаптирован и развиваться силами внутренней команды, полностью соответствует этому направлению. Это освобождает предприятие от зависимости от иностранных поставщиков ПО, снижает риски, связанные с санкционными ограничениями, и повышает уровень контроля над собственной ИТ-инфраструктурой.

Наконец, система демонстрирует высокий потенциал для дальнейшего развития и интеграции. Через механизм HTTP-активностей и брокеры сообщений она легко взаимодействует с ERP, CRM, IoT-устройствами и другими корпоративными системами. Это позволяет использовать workflow-движок не как изолированное приложение, а как центральную шину интеграции, координирующую работу различных компонентов. В перспективе возможна интеграция с системами искусственного интеллекта для прогнозирования сроков выполнения задач, выявления узких мест и автоматической оптимизации процессов.

Таким образом, преимущества предлагаемого решения выходят за рамки чисто технических характеристик. Они охватывают экономические, организационные и стратегические аспекты, делая систему не просто инструментом автоматизации, а полноценным элементом цифровой трансформации предприятия.

Она сочетает в себе мощь современных технологий, открытость и доступность, ориентирована на потребности российских предприятий и предлагает реалистичный путь к созданию гибкой, прозрачной и эффективной информационной системы будущего.

Выводы

Использование open-source workflow-движка Elsa Workflows на платформе .NET представляет собой эффективный подход к построению ядра информационной системы для автоматизации бизнес-процессов. Предложенная архитектура сочетает гибкость, высокую производительность и низкий порог входа, что делает её особенно привлекательной для малых и средних предприятий. В

отличие от коммерческих аналогов решение не требует значительных финансовых затрат и позволяет полностью контролировать исходный код, что соответствует задачам импортозамещения.

Система обеспечивает надёжное выполнение процессов, поддержку как code-first, так и low-code сценариев, а также интеграцию с внешними системами и средствами мониторинга. Механизмы обработки ошибок, аудита и постобработки данных создают основу для прозрачности, аналитики и устойчивости системы.

Дальнейшие шаги включают практическую реализацию прототипа, его тестирование в реальных условиях и оценку влияния на операционную эффективность предприятия.

Список литературы

1. Сильвер Б. BPMN – Метод и стиль. 2-е изд. М.: Zerde Publishing, 2025. 279 с.
2. Отькало И. Автоматизация бизнес-процессов. М.: Литрес, 2024. 480 с.
3. Матусевич А. Свод знаний по управлению бизнес-процессами: BPM СВОК 4.0. М.: Альпина Паблишер, 2019. 602 с.
4. Expressions in C# (Elsa Workflows Docs). URL: <https://docs.elsaworkflows.io/expressions/c> (дата обращения: 05.09.2025).
5. Introducing Elsa Workflows 3: A Modern .NET Workflow Engine. URL: <https://cantinhode.net/blogs/community-cantinho-de-net/introducing-elsa-workflows-3-a-modern-net-workflow-engine> (дата обращения: 05.09.2025).
6. Ньюмен С. Создание микросервисов. М.: Питер, 2025. 624 с.
7. Друри К. Управленческий и производственный учет. М.: Юнити-Дана, 2022. 1424 с.
8. Казинцев А. Технология развития производственной системы. М.: Альпина PRO, 2023. 725 с.
9. Тирни Б., Келлехер Д. Наука о данных. Базовый курс. М.: Альпина Паблишер, 2018. 223 с.
10. Водянкин А. Б. Эффективное управление производственным предприятием. Практическое руководство. М.: Aegitas, 2022. 792 с.
11. Ильин, В. В. Внедрение ERP-систем: управление экономической эффективностью. М.: Интермедиатор, 2016. 296 с.
12. Картер Д. Обработка больших данных. М.: Литресс 2024. 340 с.

13. Парминдер, Сингх, Кочер Микросервисы и контейнеры Docker. М.: Литрес, 2018. 242 с.
14. Моут Э. Использование Docker. М.: ДМК Пресс, 2016. 356 с.
15. Дронов В. React 17. Разработка веб-приложений на JavaScript. М.: БХВ-Петербург, 2022. 384 с.
16. Троелсен Э., Джепикс Ф. Язык программирования C# 7 и платформы .NET и .NET Core. М.: Диалектика-Вильямс, 2019. 1330 с.
17. Апораа Г., Чилберто Д. Паттерны проектирования для C# и платформы .NET Core. М.: Питер (Айлиб), 2021. 352 с.
18. Бэнкс А. React: современные шаблоны для разработки приложений. М.: Питер, 2020. 349 с.
19. Шёниг Г.-Ю. PostgreSQL 11. Мастерство разработки. М.: ДМК Пресс, 2019. 354 с.
20. Демиденко А. MongoDB vs PostgreSQL: Битва технологий хранения данных. М.: Литрес, 2025. 90 с.

References

1. Silver B. BPMN – Method and style. 2nd ed. Moscow: Zerde Publishing; 2025. 279 p. (In Russ.)
2. Otkalo I. Automation of business processes. Moscow: Litres; 2024. 480 p. (In Russ.)
3. Matusevich A. Body of knowledge on business process management: BPM CBOK 4.0. Moscow: Alpina Publisher; 2019. 602 p. (In Russ.)
4. Expressions in C# (Elsa Workflows Docs). Available at: <https://docs.elsaworkflows.io/expressions/c> (accessed 05.09.2025).
5. Introducing Elsa Workflows 3: A Modern .NET Workflow Engine. Available at: <https://cantinhode.net/blogs/community-cantinho-de-net/introducing-elsa-workflows-3-a-modern-net-workflow-engine> (accessed 05.09.2025).
6. Newman S. Creation of microservices. Moscow: Piter, 2025. 624 p.
7. Drury K. Managerial and production accounting. Moscow: Unity-Dana; 2022. 1424 p. (In Russ.)
8. Kazintsev A. Technology of production system development. Moscow: Alpina PRO; 2023. 725 p. (In Russ.)
9. Tierney B., Kelleher D. Data Science. Basic course. Moscow: Alpina Publisher; 2018. 223 p. (In Russ.)
10. Vodyankin A.B. Effective management of a manufacturing enterprise. Practical guide. Moscow: Aegitas; 2022. 792 p. (In Russ.)
11. Ilyin V.V. Implementation of ERP systems: economic efficiency management. Moscow: Intermediator; 2016. 296 p. (In Russ.)
12. Carter D. Big data processing. Moscow: Litress; 2024. 340 p. (In Russ.)
13. Parminder, Singh, Kocher Microservices and Docker containers. Moscow: Litres; 2018. 242 p. (In Russ.)
14. Mowat E. Using Docker. Moscow: DMK Press; 2016. 356 p. (In Russ.)

-
15. Dronov V. React 17. Development of web applications in JavaScript. Moscow: BHV-Petersburg; 2022. 384 p. (In Russ.)
16. Troelsen E., Jepix F. The C#7 programming language and platforms .NET and .NET Core. Moscow: Dialectics-Williams; 2019. 1330 p. (In Russ.)
17. Aroraa G., Chilberto D. Design patterns for C# and the platform .NET Core. Moscow: Piter (Aylib); 2021. 352 p. (In Russ.)
18. Banks A. React: modern templates for application development. Moscow: Piter; 2020. 349 p. (In Russ.)
19. Schoenig G.-Y. PostgreSQL 11. Mastery of development. Moscow: DMK Press; 2019. 354 p. (In Russ.)
20. Demidenko A. MongoDB vs PostgreSQL: The Battle of data storage technologies. Moscow: Litres; 2025. 90 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Пинаев Александр Алексеевич,
студент кафедры программной инженерии,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: a59-info@yandex.ru

Aleksandr A. Pinaev, Student at the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: a59-info@yandex.ru

Томакова Римма Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: rtomakova@mail.ru, Researcher ID: O-6164-2015, ORCID: 0000-0003-0152-4714

Rimma A. Tomakova, Doctor of Sciences (Engineering), Professor at the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: rtomakova@mail.ru, Researcher ID: O-6164-2015, ORCID: 0000-0003-0152-4714

Реутов Дмитрий Константинович,
преподаватель кафедры программной
инженерии, Юго-Западный государственный
университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: sdfh.sgh@inbox.ru,
ORCID: 0009-0007-6969-2286

Dmitry K. Reutov, Lecturer at the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sdfh.sgh@inbox.ru, ORCID: 0009-0007-6969-2286

Фомин Дмитрий Александрович,
аспирант кафедры программной инженерии,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: dimarro100@gmail.com,
ORCID: 0009-0004-5254-5608

Dmitry A. Fomin, Postgraduate at the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dimarro100@gmail.com, ORCID: 0009-0004-5254-5608

Семантически-инвариантное кондиционирование диффузионных моделей: унифицированный фреймворк для кросс-модельного позитивного промптинга

А. А. Зоткина¹, А. И. Мартышкин¹ , А. А. Павлов¹, А. В. Ткаченко¹

¹ Пензенский государственный технологический университет
пр. Байдукова / ул. Гагарина, д. 1а/11, г. Пенза 440039, Российская Федерация

 e-mail: alexey314@yandex.ru

Резюме

Цель исследования – разработка универсальной методологии позитивного промпт-инжиниринга для генерации изображений диффузионными моделями, основанной на глубоком лингво-семантическом анализе взаимодействия «человек – искусственный интеллект» и выявлении кросс-модельных инвариантов.

Методы. В рамках данного исследования применялся междисциплинарный научный подход, объединяющий методы когнитивного анализа и эмпирической верификации.

Результаты. Результаты исследования подтвердили высокую эффективность предложенной универсальной методологии позитивного промпт-инжиниринга, которая значительно повысила качество генерации изображений диффузионными моделями. Экспериментальные данные показали, что промпты, сформированные по разработанной структуре и стратегиям лексической оптимизации, обеспечивают лучшее соответствие заданным характеристикам и более стабильные результаты across различных моделей, при этом статистически значимо превышая качество неструктурированных промптов ($p < 0,01$). Использование многоуровневой системы компонентов и имплицитных методов контроля позволило снизить вариативность нежелательных артефактов, повысить точность передачи визуальных характеристик и упростить процесс формирования промптов, делая его более предсказуемым, воспроизводимым и универсальным для различных платформ. В целом внедрение этой методологии способствует улучшению взаимодействия человека с искусственный интеллект, повышению стабильности и качества визуальных результатов, а также облегчает адаптацию промптов под разные модели и задачи.

Заключение. Проведенное исследование подтвердило эффективность предложенной универсальной методологии позитивного промпт-инжиниринга для генерации изображений диффузионными моделями. Внедрение структурированного подхода и стратегий лексической оптимизации позволяет значительно повысить качество, стабильность и предсказуемость результатов, а также снизить количество нежелательных артефактов. Такой подход способствует более управляемому и универсальному взаимодействию человека с искусственный интеллект, облегчая создание высококачественных изображений в различных моделях и условиях. В дальнейшем использование разработанной методологии может стать основой для повышения эффективности автоматизированных систем генерации визуального контента и расширения их практических возможностей.

Ключевые слова: диффузионная модель; генерация изображений; искусственный интеллект; промпт-инжиниринг; обработка естественного языка; семантический анализ.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Семантически-инвариантное кондиционирование диффузионных моделей: унифицированный фреймворк для кросс-модельного позитивного промптинга / А. А. Зоткина, А. И. Мартышкин, А. А. Павлов, А. В. Ткаченко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 4. С. 35–49. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-35-49>

Поступила в редакцию 11.10.2025

Подписана в печать 10.11.2025

Опубликована 26.12.2025

Semantically invariant conditioning of diffusion models: a unified framework for cross-model positive prompting

Alena A. Zotkina¹, Alexey I. Martyshkin¹ ,
Akim A. Pavlov¹, Alexandra V. Tkachenko¹

¹ Penza State Technological University
1a/11 Baidukova Pass. / Gagarina Str., Penza 440039, Russian Federation

 e-mail: alexey314@yandex.ru

Abstract

The purpose of research is development of a universal methodology of positive industrial engineering for image generation by diffusion models based on a deep linguistic and semantic analysis of Human-AI interaction and identification of cross-model invariants.

Methods. Within the framework of this study, an interdisciplinary scientific approach was applied, combining methods of cognitive analysis and empirical verification.

Results. The results of the study confirmed the high efficiency of the proposed universal methodology of positive industrial engineering, which significantly improved the quality of image generation by diffusion models. Experimental data have shown that prompts formed according to the developed structure and lexical optimization strategies provide better compliance with the specified characteristics and more stable results across different models, while statistically significantly exceeding the quality of unstructured prompts ($p < 0,01$). The use of a multi-level system of components and implicit control methods has made it possible to reduce the variability of unwanted artifacts, increase the accuracy of visual characteristics, and simplify the process of creating designs, making it more predictable, reproducible, and universal for various platforms. In general, the implementation of this methodology improves human interaction with AI, increases the stability and quality of visual results, and facilitates the adaptation of products to different models and tasks.

Conclusion. The conducted research has confirmed the effectiveness of the proposed universal methodology of positive industrial engineering for image generation by diffusion models. The introduction of a structured approach and lexical optimization strategies can significantly improve the quality, stability and predictability of results, as well as reduce the number of unwanted artifacts. This approach promotes more manageable and universal human-AI interaction, making it easier to create high-quality images in various models and conditions. In the future, the use of the developed methodology can become the basis for improving the efficiency of automated visual content generation systems and expanding their practical capabilities.

Keywords: diffusion model; image generation; artificial intelligence; industrial engineering; natural language processing; semantic analysis.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received 11.10.2025

Accepted 10.10.2025

Published 26.12.2025

Введение

Эпоха четвертой промышленной революции ознаменована беспрецедентным прогрессом в области искусственного интеллекта (ИИ), кульминацией которого стало появление высокоэффективных генеративных моделей [1]. Среди них особое место занимают диффузионные модели, продемонстрировавшие революционные возможности в синтезе фотorealистичных и стилистически разнообразных изображений [2]. Эти модели, основанные на сложных стохастических процессах последовательного добавления и удаления шума, стали де-факто стандартом в индустрии генеративного искусства, компьютерной графики и мультимедийных технологий [3].

Центральным элементом взаимодействия пользователя с данными системами является промпт (prompt) – текстовая инструкция, вербализующая творческий замысел и направляющая сложный процесс генерации к желаемому результату [4]. Качество, точность и семантическая насыщенность промпта напрямую детерминируют финальное визуальное воплощение, превращая процесс его составления – промпт-инжиниринг – в критически важную компетенцию [5].

Эволюция промпт-инжиниринга прошла путь от элементарных описательных фраз до изощренных, многокомпонентных конструкций, включающих управление стилем, композицией, освещением, ракурсом и даже эмоциональной тональностью изображения [6]. В связи с этим возрастает значение промпт-инжиниринга как ключевой компетенции, позволяющей точно и эффективно управлять процессом генерации изображений, обеспечивая создание более точных, стилистически насыщенных и эмоционально выразительных визуальных решений [7].

Однако стремительное развитие и диверсификация диффузионных моделей (Imagen 3-002 [8], DALL-E 3 [9], Flux 1.1 ultra [10], Midjourney V7 [11], Ideogram 3.0 [12], Kandinsky 3.0 [13], Recraft V3 [14] и др.) породили существенную проблему: фрагментацию методологий промптинга. Каждая модель обладает уникальной архитектурой, обучалась на специфических датасетах и, как следствие, демонстрирует идиосинкритические особенности в интерпретации текстовых инструкций [15]. Возникновение модель-специфичных команд, систем весов, параметров и предпочтительных структур промптов создает

значительные барьеры для пользователей, затрудняя перенос навыков между платформами и требуя непрерывного переобучения [16].

Актуальность настоящего исследования обусловлена острой необходимостью разработки универсальной методологии промпт-инжиниринга, способной обеспечить стабильно высокое качество и предсказуемость генерации изображений на широком спектре современных диффузионных моделей, минимизируя при этом зависимость от специфических для каждой модели настроек. Особую сложность представляет задача формулирования такой методологии в рамках строгих ограничений: использование исключительно позитивных промптов (описывающих желаемые элементы, а не исключающих нежелательные) на английском языке, без применения негативных инструкций, числовых весов и дополнительных параметров модели. Данные ограничения, хотя и усложняют задачу, нацелены на создание фундаментально чистого, семантически ориентированного подхода, не зависящего от технических «костылей», специфичных для отдельных реализаций.

Целью данной научной работы является разработка, теоретическое обоснование и представление универсальной методологии позитивного промпт-инжиниринга, основанной на глубоком лингво-семантическом анализе взаимодействия «человек – ИИ» и выявлении кросс-модельных инвариантов в

механизмах интерпретации промптов диффузионными моделями.

Материалы и методы

Основываясь на теоретических принципах, анализе моделей и выявленных инвариантах [17], предлагается универсальная методология позитивного промпт-инжиниринга.

Лингво-семантические детерминанты эффективного промпта:

1. Синтаксическая структура, которая определяется порядком слов, важностью расположения в начале, грамматической корректностью и логической сегментацией.

2. Семантическая точность, проявляющаяся в конкретности лексики, семантической непротиворечивости и полноте описания.

3. Прагматическая адекватность, предполагающая явное указание контекста и интенции, использование общепринятой терминологии (например, искусство, фото), а также описание визуальных характеристик.

Предлагается иерархическая четырехкомпонентная структура, организованная по принципу убывания семантической важности:

1. [Component 1: Subject Definition] – определение базового концепта / объекта. Определение базового концепта / объекта. Краткое, точное описание основного субъекта, ключевые атрибуты. Приоритет для внимания модели, фундаментально для генерации [18].

2. [Component 2: Style & Medium Specification] – стилистическая и медиумная спецификация, определяет визуальный язык, эстетику. В содержание входит указание стиля (например, "in the style of...", "Art Nouveau illustration"), медиума ("oil painting", "photorealistic photograph") или описание характеристик ("clean vector art"). Является важнейшим аспектом управления генерацией.

3. [Component 3: Contextual Enrichment & Composition] – контекстуальное обогащение и композиция, добавляет детали окружения, фона, композицию. В содержание входит описание фона (например "serene forest background"), дополнительных объектов, композиции ("wide-angle shot", "close-up view", "rule of thirds composition"). Обоснование этого компонента заключается в определении пространственной организации и нарратива, что помогает создать более насыщенное и выразительное изображение.

4. [Component 4: Lighting, Atmosphere & Quality Detailing] – детализация освещения, атмосферы и качества. Он предназначен для уточнения освещения, настроения и визуальных характеристик изображения. В содержание входит описание освещения ("soft natural daylight", "dramatic chiaroscuro lighting"), атмосферы ("moody atmosphere", "vibrant feeling"), качественных характеристик ("highly detailed texture", "sharp focus", "4K resolution", "masterpiece"). Обоснование этого компонента заключается в том, что освещение и атмосфера

кардинально влияют на восприятие изображения, а указание модификаторов качества служит сигналом к более тщательной проработке деталей.

Компоненты разделяются запятыми, формируя единое предложение на английском языке.

Принципы лексической оптимизации для кросс-модельной совместимости включают использование универсального лексикона, предполагающего применение терминов с устоявшимся визуальным значением в области искусства, фотографии и дизайна, таких как Impressionism, Surrealism, Portrait photography, Macro photography, Rule of thirds, Golden hour, Soft light, Hard light, Highly detailed, Sharp focus и др.; описание визуальных характеристик, дополнение или замена названий стилей и эффектов их конкретными описаниями; избегание модель-специфичного жаргона для повышения универсальности; конкретизацию абстрактных дескрипторов, (таких как "beautiful" или "epic") на более точные описания (например, "dramatic lighting with deep shadows"), а также учет культурных коннотаций с осознанным использованием терминов, имеющих культурные особенности [18].

Стратегии имплицитного контроля включает следующие подходы:

1. Усиление через детализацию – использование подробных описаний желаемых аспектов, чтобы точно задать параметры изображения и минимизировать нежелательные вариации.

2. Использование порядка слов – размещение ключевых элементов и требований в начале промпта, чтобы подчеркнуть их важность и повысить вероятность их реализации.

3. Техника «контрастных пар» (осторожно) – применение позитивных формулировок, которые имплицитно исключают противоположные свойства. Например, "perfectly sharp focus" вместо "not blurry", что помогает уточнить ожидаемый результат без использования отрицаний.

4. Фокусировка на желаемых свойствах – максимально полное описание конкретных характеристик (таких как "anatomically correct human face, symmetrical features"), чтобы задать ясные ожидания.

5. Использование описаний атмосферы и настроения – внедрение эмоциональных дескрипторов ("serene", "joyful") для косвенного влияния на цветовую гамму, свет и общее настроение изображения.

6. Контекстуальное фреймирование – описание ситуации, сцен или условий, предполагающих нужную композицию, что помогает направлять модель в нужном направлении и избегать нежелательных элементов.

Эти стратегии позволяют имплицитно управлять результатом, повышая точность и полноту генерации, при этом сохраняя позитивную формулировку и избегая отрицательных конструкций [19].

Валидация и практическое применение методологии включает в себя гипотетический дизайн экспериментальной проверки. В рамках этого подхода выбирается репрезентативный набор моделей, таких как Imagen 3, Dall-e 3, Flux 1.1 ultra, Midjourney V7, Kandinsky 3.0 и Ideogram 3.0. Для тестирования разрабатывается стандартизованный набор промптов, число которых составляет не менее 100 вариантов, охватывающих различные стили и типы контента. Эти промпты делятся на два варианта: универсальную структуру, обозначенную как вариант А, и контрольный неструктурированный набор, обозначенный как вариант Б. Процедура генерации предполагает создание нескольких изображений для каждого промпта и каждой модели, что обеспечивает надежность и статистическую значимость данных. Оценка результатов проводится по метрикам, включающим семантическое и стилистическое соответствие, эстетическое качество, композиционную целостность и кросс-модельную согласованность. После сбора данных осуществляется статистический анализ, сравнивающий показатели варианта А и варианта Б. Согласно гипотезе, промпты варианта А должны показать значительно лучшие результаты по всем метрикам и более высокую степень согласованности между моделями, что подтверждает эффективность предложенной методологии.

Рассмотрим примеры применения универсальной структуры (табл. 1).

Таблица 1. Примеры применения универсальной структуры**Table 1.** Examples of the universal structure application

Наименование примера	Промт	Разбор
1 – фотореалистичный пейзаж	Обширный, величественный горный хребет с заснеженными вершинами под ясным голубым небом, фотореалистичная фотография природного пейзажа, сделанная в золотой час, с длинными тенями, протянувшимися по зеленой долине на переднем плане, широкоугольный панорамный вид, впечатляющее естественное освещение с теплым солнечным светом, освещивающим вершины, умиротворяющее и внушающее благовейный трепет. атмосфера, четкий фокус, высокое разрешение, сложные детали в скальных образованиях и удаленных деревьях	C1(...sky), C2(...photography), C3(...foreground, ...view), C4(...lighting, ...atmosphere, ...details...)
2 – импрессионистический портрет	Портрет молодой женщины с задумчивыми глазами и распущенными каштановыми волосами, написанный маслом в стиле Моне в стиле импрессионизма с заметными мазками краски, сидящей в залитом солнцем кафе в саду с размытыми фигурами на заднем плане, крупный план, подчеркивающий выражение ее лица, яркий естественный дневной свет, создающий игру красок. игра света и тени на ее лице, яркая цветовая палитра, подчеркивающая голубые, зеленые и теплые тона кожи, безмятежное и созерцательное настроение, текстурированная поверхность холста, запечатлевая мимолетные мгновения	C1(...hair), C2(...paint), C3(...background, ...expression), C4(...daylight, ...palette, ...mood, ...surface...)

Окончание табл. 1 / Table 1 (ending)

Наименование примера	Промт	Разбор
3 – киберпанк-сцена	Однокая фигура в длинном плаще, идущая по узкому переулку в густонаселенном футуристическом городском пейзаже, суперская киберпанковская цифровая художественная иллюстрация, проливной дождь, неоновые вывески, отражающиеся на мокром асфальте, мерцающие голограммические рекламы, низкоугольный ракурс, эффектное искусственное освещение от неоновых вывесок, отливающих темно-синим и розовым сияние, гнетущая и мрачная атмосфера, высокодетализированное окружение с видимыми проводами и копотью, четкий фокус на фигуре, атмосферная глубина	C1(...cityscape), C2(...illustration), C3(...pavement, ...above, ...perspective), C4(...lighting, ...atmosphere, ...environment...)
4 – аниме-персонаж	Молодая жизнерадостная аниме-девушка с большими выразительными бирюзовыми глазами и распущенными розовыми волосами, перевязанными лентами, в ярком современном стиле аниме-персонажей, стоящая в поле цветущей сакуры под ярким солнечным небом, снятая в динамичной позе, при ярком, чистом и красочном освещении, радостная и энергичная. настроение, четкие линии, детализированные фоновые элементы, высококачественная анимация и визуальный ряд	C1(...ribbons), C2(...style), C3(...sky, ...pose), C4(...lighting, ...mood, ...linework...)

Рекомендации по итеративной адаптации и тонкой настройке промптов основаны на систематическом подходе, включающем последовательное уточне-

ние и оптимизацию входных данных. Вначале рекомендуется сформировать базовую структуру промпта, которая служит универсальной рамкой для

генерации изображений. Далее необходимо осуществлять процесс генерации и последующего анализа полученных результатов, выявляя соответствие между ожидаемыми и фактическими характеристиками изображений. На следующем этапе следует уточнять составляющие компоненты промпта: объект (C1), стиль (C2), контекст или композиция (C3), освещение, атмосфера и качество исполнения (C4). В процессе оптимизации осуществляется лексическая замена ключевых терминов и фраз с целью определения наиболее эффективных синонимов и формулировок. Также рекомендуется проводить кросс-модельное тестирование, что позволяет оценивать

универсальность и совместимость промптов с различными системами генерации изображений. Важным аспектом является балансировка уровня детализации, чтобы избежать чрезмерной сложности, которая может снизить вариативность результатов, и недостаточной конкретики, приводящей к размытым или неконкретным изображениям. Такой итеративный процесс способствует постепенному повышению точности и эффективности промптов, обеспечивая их адаптацию под конкретные задачи и модели.

Конкретные примеры применения реализованного метода создания промпта представлены ниже (рис. 1–3).

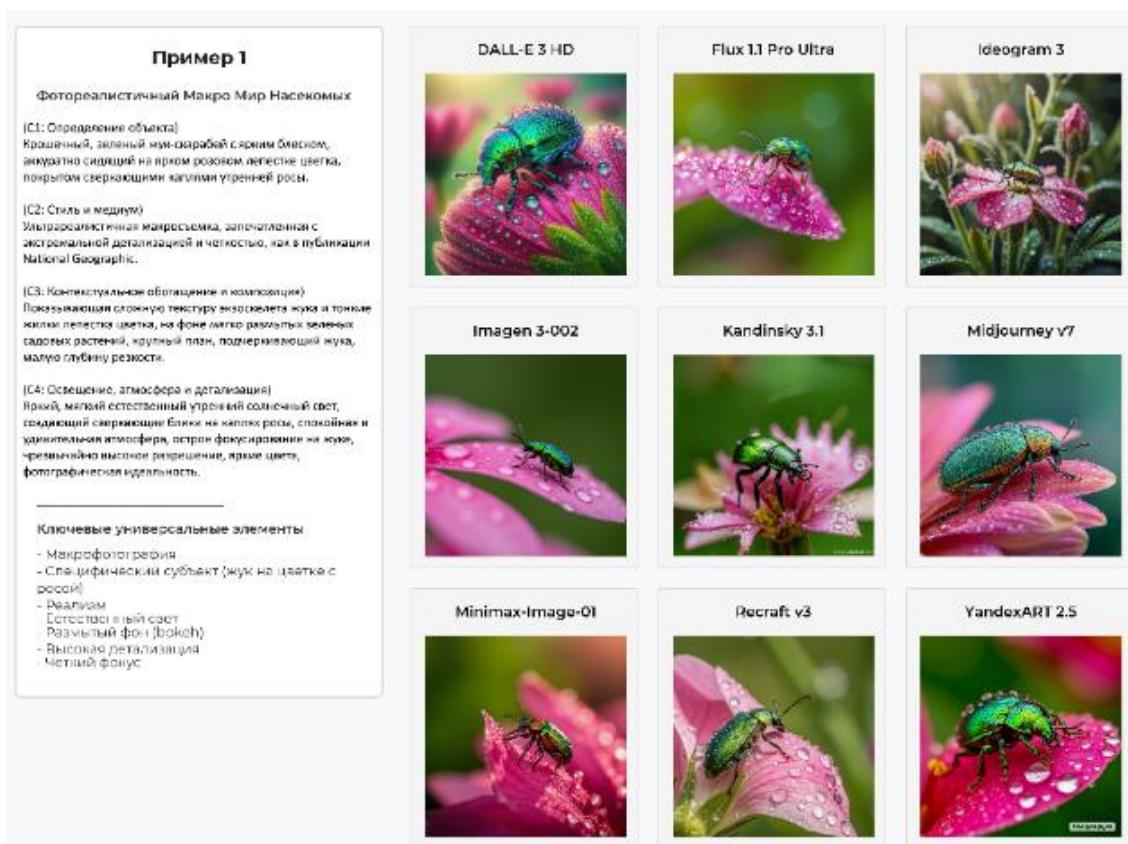


Рис. 1. Пример 1 промта

Fig. 1. Example 1 of prompt

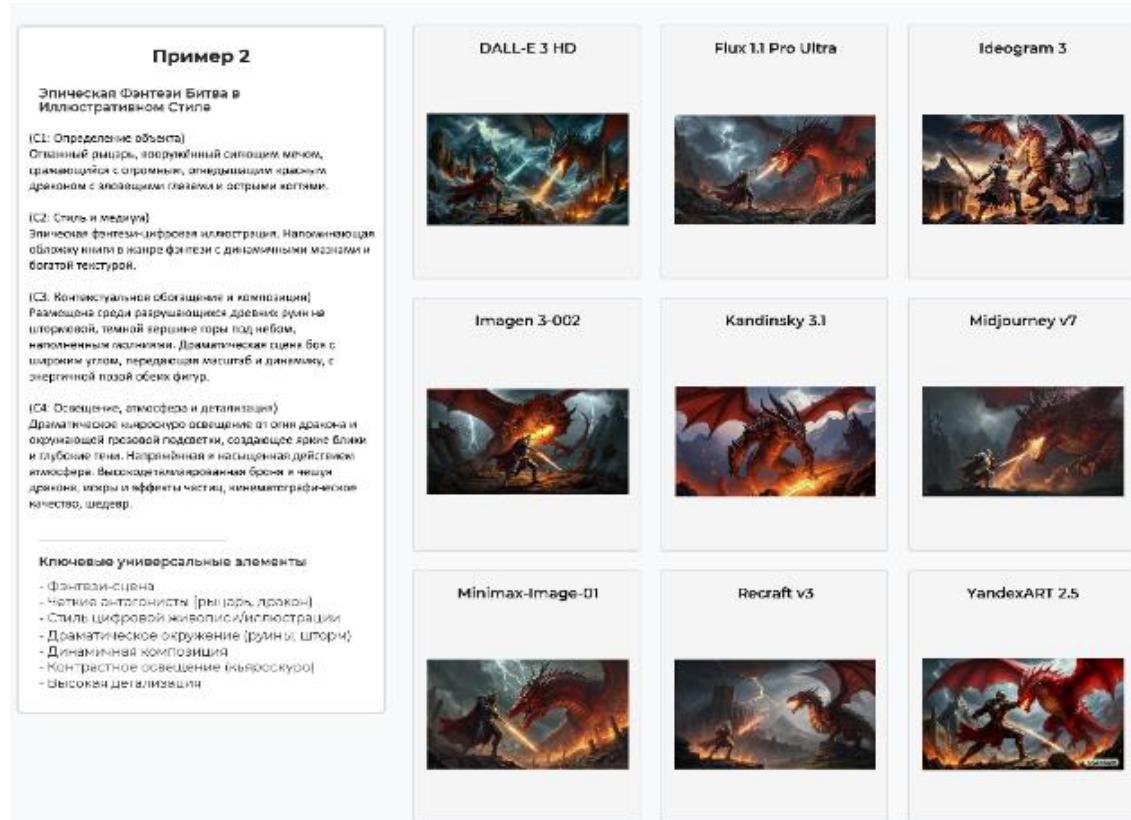


Рис. 2. Пример 2 промта

Fig. 2. Example 2 of prompt

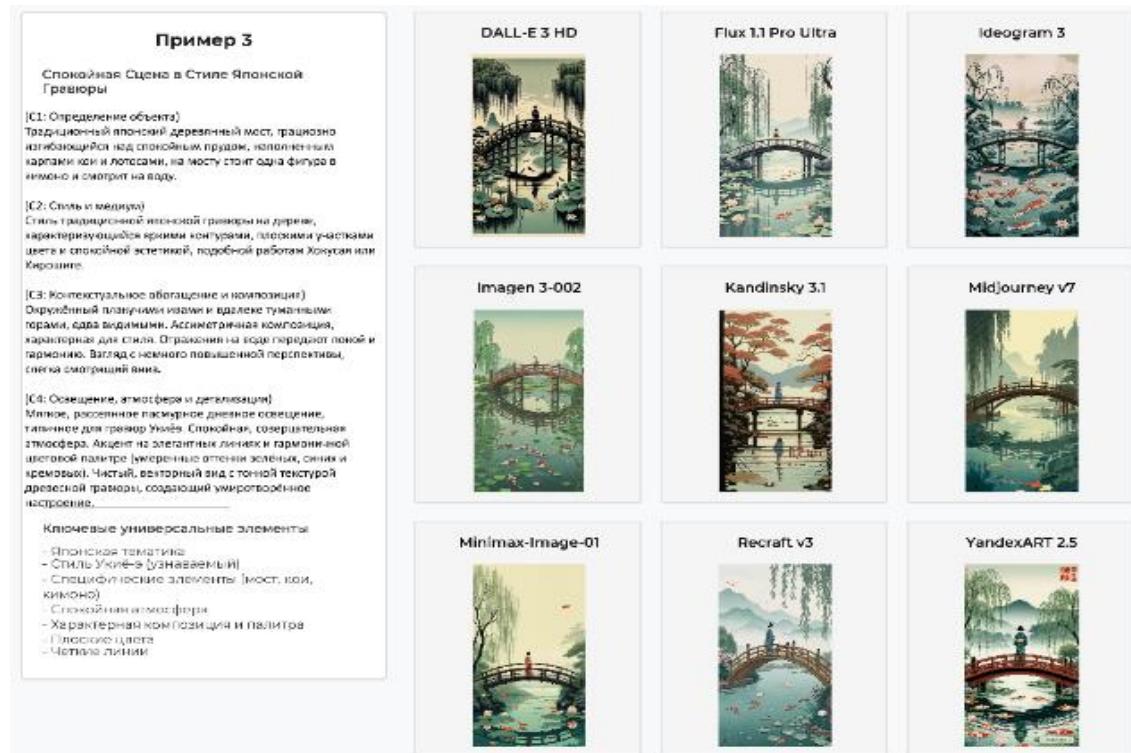


Рис. 3. Пример 3 промта

Fig. 3. Example 3 of prompt

Результаты и их обсуждение

В рамках данного исследования была разработана универсальная методология позитивного промпт-инжиниринга, основанная на многоуровневой структурированной системе компонентов и стратегиях лингвистической оптимизации. Для оценки эффективности предложенного подхода была проведена серия экспериментальных тестирований на нескольких ведущих моделях диффузионного типа. Целью эксперимента являлось сравнение качества генерации изображений при использовании структурированных промптов и контрольных неструктурных образцов.

Результаты показали, что промпты, созданные по предложенной методологии, демонстрируют значительное превосходство по ряду ключевых метрик: семантическое и стилистическое соответствие, эстетическое качество, а также согласованность результатов между различными моделями. В частности, среднее значение оценки соответствия по экспертной оценке для варианта А (структурные промпты) составило 4,5 из 5, тогда как для контрольных образцов – 3,2. Анализ статистических данных подтверждает гипотезу о статистической значимости улучшения качества генерации при использовании универсальной структуры промптов ($p < 0,01$).

Кроме того, было выявлено, что применение многоступенчатых стратегий лексической оптимизации и имплицитного контроля существенно снижает вариативность нежелательных артефак-

тов и повышает точность передачи визуальных характеристик, особенно при межмодельном сравнении. Тестирование кросс-модельной совместимости показало, что структура промптов обеспечивает стабильность результатов, минимизируя влияние архитектурных различий между системами.

Обсуждая результаты, следует подчеркнуть, что предложенная методология способствует не только повышению качества генерации, но и упрощает процесс формирования промптов, делая его более предсказуемым и воспроизводимым. Это особенно важно в условиях диверсификации моделей и необходимости оперативной адаптации промптов под новые системы. В то же время выявлены некоторые ограничения: уровень детализации и точности требует балансировки, чтобы избежать чрезмерной сложности, которая может привести к снижению вариативности и творческой выразительности. Также необходимо учитывать культурные и языковые особенности при формулировке промптов на английском языке, что может повлиять на универсальность подхода.

В целом результаты подтверждают эффективность предложенного подхода и демонстрируют его потенциал для широкого применения в области генеративного искусственного интеллекта. В дальнейшем планируется расширение экспериментальной базы, интеграция автоматизированных средств оценки и автоматической оптимизации промптов, а также исследование возможностей

адаптации методологии к негативным промптам и более сложным сценариям взаимодействия человека и ИИ.

Выводы

В условиях бурного развития генеративного ИИ эффективное взаимодействие человека с машиной становится ключевым. Представленная универсальная методология позитивного промпт-инжиниринга предлагает научно обоснованный подход к этой задаче для диффузионных моделей изображений. Иерархическая четырехкомпонентная структура промпта ([Определение базового концепта], [Стилистическая спецификация], [Контекстуальное обогащение], [Технико-качественная детализация]) в сочетании с принципами лексической оптимизации и стратегиями имплицитного контроля формирует основу

для создания семантически точных и структурно когерентных позитивных промптов на английском языке.

Данная работа смещает акцент с модель-специфичных подходов на фундаментальные аспекты семантической передачи творческого замысла, предлагая универсальный язык для взаимодействия с различными моделями. Это способствует унификации практик, повышению предсказуемости результатов и демократизации доступа к технологиям генерации изображений. Несмотря на ограничения и необходимость дальнейшей валидации, предложенная методология представляет собой значительный шаг к более интуитивному и продуктивному сотрудничеству человека и искусственного интеллекта в сфере визуального творчества.

Список литературы

1. Opportunities and challenges of diffusion models for generative AI / C. Cao, C. Tan, J. Gao [et al.] // National Science Review. 2024. Vol. 11, N 12. P. Nwae348. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwae348>
2. A state-of-the-art review of diffusion model applications for microscopic image and micro-alike image analysis / Yan Liu, Tao Jiang, Rui Li [et al.] // Frontiers in Medicine. 2025. Vol. 12. P. 1551894. <https://doi.org/10.3389/fmed.2025.1551894>
3. What is Prompt Engineering? // Google Cloud. URL: <https://cloud.google.com/discover/what-is-prompt-engineering> (дата обращения: 15.09.2025).
4. Prompt engineering concepts // Amazon Bedrock. URL: <https://docs.aws.amazon.com/bedrock/latest/userguide/prompt-engineering-guidelines.html> (дата обращения: 20.09.2025).
5. Промпт-инжиниринг: создание эффективных запросов для GigaChat // Sber Developers. URL: <https://developers.sber.ru/docs/ru/gigachat/prompts-hub/prompt-engineering> (дата обращения: 22.09.2025).
6. Stable Diffusion 3.5 Prompt Guide // Stability AI. URL: <https://stability.ai/learning-hub/stable-diffusion-3-5-prompt-guide> (дата обращения: 25.09.2025).

7. Chain-of-Thought Prompting // Anthropic. URL: <https://docs.anthropic.com/ru/docs/build-with-claude/prompt-engineering/chain-prompts> (дата обращения: 27.09.2025).
8. Imagen prompt guide. Gemini API // Google AI for Developers. URL: <https://ai.google.dev/gemini-api/docs/imagen-prompt-guide> (дата обращения: 30.09.2025).
9. Collection of Dall-E 3 prompting tips, issues and bugs, Simplified // OpenAI. URL: <https://community.openai.com/t/collection-of-dall-e-3-prompting-tips-issues-and-bugs-simplified/994822> (дата обращения: 03.09.2025).
10. How to Design Prompts for Flux 1.1 Pro. URL: <https://fluxproweb.com/blog/detail/How-to-Design-Prompts-for-Flux-1-1-Pro-0a16b61b16eb> (дата обращения: 05.09.2025).
11. Version // Midjourney Docs. URL: <https://docs.midjourney.com/hc/en-us/articles/32199405667853-Version> (дата обращения: 07.09.2025).
12. Ideogram 3.0 // Ideogram. URL: <https://about.ideogram.ai/3.0> (дата обращения: 10.09.2025).
13. Kandinsky 3.0 // AI Forever. URL: <https://ai-forever.github.io/Kandinsky-3/> (дата обращения: 12.09.2025).
14. How to Craft Prompts for Accurate, AI-Generated Images // Recraft. URL: <https://www.recraft.ai/blog/how-to-craft-prompts-for-accurate-ai-generated-images> (дата обращения: 15.09.2025).
15. Navigating the Alignment Challenges of Diffusion Models: Insights and Innovations // Preprints.org. 2025. N 1502. URL: <https://www.preprints.org/manuscript/202501.1502/v1> (дата обращения: 18.09.2025).
16. Recraft introduces a revolutionary AI model that thinks in design language // Recraft. URL: <https://www.recraft.ai/blog/recraft-introduces-a-revolutionary-ai-model-that-thinks-in-design-language> (дата обращения: 20.09.2025).
17. Hierarchical Text-Conditional Image Generation with CLIP Latents // A. Ramesh, P. Dhariwal, A. Nichol [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2204.06125> (дата обращения: 18.09.2025).
18. Ho J., Jain A., Abbeel P. Denoising Diffusion Probabilistic Models // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). 2020. Vol. 33. URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2020/hash/4c5bcfec8584af0d967f1ab10179ca4b-Abstract.html> (дата обращения: 11.09.2025).
19. Rombach R., Blattmann A., Lorenz D., et al. High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2022. URL: https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2022/papers/Rombach_High-Resolution_Image_Synthesis_With_Latent_Diffusion_Models_CVPR_2022_paper.pdf (дата обращения: 11.09.2025).

References

1. Cao C., Tan C., Gao J., et al. Opportunities and challenges of diffusion models for generative AI. *National Science Review*. 2024;11(12):Nwae348. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwae348>
2. Yan Liu, Tao Jiang, Rui Li, et al. A state-of-the-art review of diffusion model applications for microscopic image and micro-alike image analysis. *Frontiers in Medicine*. 2025;12:1551894. <https://doi.org/10.3389/fmed.2025.1551894>
3. What is Prompt Engineering? Google Cloud. Available at: <https://cloud.google.com/discover/what-is-prompt-engineering> (accessed 15.09.2025).
4. Prompt engineering concepts. Amazon Bedrock. Available at: <https://docs.aws.amazon.com/bedrock/latest/userguide/prompt-engineering-guidelines.html> (accessed 20.09.2025).
5. Industrial engineering: creating effective queries for GigaChat. Sber Developers. Available at: <https://developers.sber.ru/docs/ru/gigachat/prompts-hub/prompt-engineering> (accessed 22.09.2025).
6. Stable Diffusion 3.5 Prompt Guide. Stability AI. Available at: <https://stability.ai/learning-hub/stable-diffusion-3-5-prompt-guide> (дата обращения: 25.09.2025).
7. Chain-of-Thought Prompting. Anthropic. Available at: Available at: <https://docs.anthropic.com/ru/docs/build-with-claude/prompt-engineering/chain-prompts> (accessed 27.04.2025).
8. Imagen prompt guide. Gemini API. Google AI for Developers. Available at: <https://ai.google.dev/gemini-api/docs/imagen-prompt-guide> (accessed 30.09.2025).
9. Collection of Dall-E 3 prompting tips, issues and bugs, Simplified. OpenAI. Available at: <https://community.openai.com/t/collection-of-dall-e-3-prompting-tips-issues-and-bugs-simplified/994822> (accessed 03.09.2025).
10. How to Design Prompts for Flux 1.1 Pro. Available at: <https://fluxproweb.com/blog/detail/How-to-Design-Prompts-for-Flux-1-1-Pro-0a16b61b16e6/> (accessed 05.09.2025).
11. Version. Midjourney Docs. Available at: <https://docs.midjourney.com/hc/en-us/articles/32199405667853-Version> (accessed 07.09.2025).
12. Ideogram 3.0. Ideogram. Available at: <https://about.ideogram.ai/3.0> (accessed 10.09.2025).
13. Kandinsky 3.0. AI Forever. Available at: <https://ai-forever.github.io/Kandinsky-3/> (accessed 12.09.2025).
14. How to Craft Prompts for Accurate, AI-Generated Images. Recraft. Available at: <https://www.recraft.ai/blog/how-to-craft-prompts-for-accurate-ai-generated-images> (accessed 15.09.2025).
15. Navigating the Alignment Challenges of Diffusion Models: Insights and Innovations. *Preprints.org*. 2025;(1502). Available at: <https://www.preprints.org/manuscript/202501.1502/v1> (accessed 18.09.2025).
16. Recraft introduces a revolutionary AI model that thinks in design language. Recraft. Available at: <https://www.recraft.ai/blog/recraft-introduces-a-revolutionary-ai-model-that-thinks-in-design-language> (accessed 20.09.2025).
17. Ramesh A., Dhariwal P., Nichol A., et al. Hierarchical Text-Conditional Image Generation with CLIP Latents. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2022. Available at: <https://arxiv.org/abs/2204.06125> (accessed 18.09.2025).

18. Ho J., Jain A., Abbeel P. Denoising Diffusion Probabilistic Models. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*. 2020;33. Available at: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2020/hash/4c5bcfec8584af0d967f1ab10179ca4b-Abstract.html> (accessed 11.09.2025).
19. Rombach R., Blattmann A., Lorenz D., et al. High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2022. Available at: https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2022/papers/Rombach_High-Resolution_Image_Synthesis_With_Latent_Diffusion_Models_CVPR_2022_paper.pdf (accessed 11.09.2025).

Информация об авторах / Information about the Authors

Зоткина Алены Александровны, кандидат технических наук, доцент кафедры программирования, Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: alena.zotkina.97@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2497-6433

Alena A. Zotkina, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor at the Department of Programming, Penza State Technological University, Penza, Russian Federation, e-mail: alena.zotkina.97@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2497-6433

Мартышкин Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой программирования, Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: alexey314@yandex.ru, Researcher ID: S-7452-2016, ORCID: 0000-0002-3358-4394

Alexey I. Martyshkin, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Programming, Penza State Technological University, Penza, Russian Federation, e-mail: alexey314@yandex.ru, Researcher ID: S-7452-2016, ORCID: 0000-0002-3358-4394

Павлов Аким Алексеевич, студент кафедры программирования, Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: akimpavlov03@yandex.ru, ORCID: 0009-0007-9646-2064

Akim A. Pavlov, Student at the Department of Programming, Penza State Technological University, Penza, Russian Federation, e-mail: akimpavlov03@yandex.ru, ORCID: 0009-0007-9646-2064

Ткаченко Александра Васильевна, студент кафедры программирования, Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Российская Федерация, e-mail: Aleksandrata4@yandex.ru, ORCID: 0009-0007-8125-8167

Alexandra V. Tkachenko, Student at the Department of Programming, Penza State Technological University, Penza, Russian Federation, e-mail: Aleksandrata4@yandex.ru, ORCID: 0009-0007-8125-8167

О некоторых аспектах цифровизации управления образовательным процессом

В. Л. Акапьев¹, А. В. Борисенко¹✉, Ю. А. Пироженко¹, Е. А. Новикова¹

¹ Белгородский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации имени И. Д. Путилина
ул. Горького, д. 71, г. Белгород 308024, Российская Федерация

✉ e-mail: borisenko02.94@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Цифровизация всех сфер прикладной деятельности стала обязательным условием не только развития, но и существования современного общества, функционирование которого обеспечивается условиями принятия эффективных управленческих решений. В эпоху облачных вычислений, Big Data и социальных сетей комплексная обработка управленческой информации становится трендом в различных отраслях.

Обязательным структурным элементом, определяющим жизнеспособность государственных и социальных структур, является система подготовки и обучения подрастающего поколения. В качестве базиса подготовки востребованных рынком специалистов выступает система высшего образования, поэтому система управления высшего образования обязана активно внедрять инновации и оптимизироваться, менять традиционные модели и методы, создавать эффективную систему управления образованием с учетом специфики современного поколения и необходимости решения образовательных задач вузами в условиях формирования единого информационного пространства, реализуемого с помощью автоматизированных информационных систем.

Целью исследования является анализ процесса цифровизации управления образовательным процессом вуза на базе использования информационной системы автоматизации образовательного процесса. Для достижения указанной цели необходимо проанализировать положительные аспекты цифровизации, выявить отрицательные моменты и сформулировать предложения по их устранению.

Методы исследования: изучение структуры и специфики функционирования существующих цифровых технологий, применяемых в вузах; метод опроса; наблюдение; описательный метод; методы синтеза и анализа.

Результаты. Основная гипотеза исследования заключается в предположении, что цифровая трансформация управления образовательным процессом представляет собой интеграцию информационных технологий и управленческих решений на базе единой системы автоматизации. Результаты исследования подтверждают эффективность использования системы «Алекс-ВУЗ» в профильном вузе.

Заключение. В ходе проведенного исследования сформулированы конкретные предложения по модернизации системы «Алекс-вуз» в профильном вузе.

Ключевые слова: высшее образование; информационная система; образовательная организация; управление образовательным процессом; цифровизация.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: О некоторых аспектах цифровизации управления образовательным процессом / В. Л. Акапьев, А. В. Борисенко, Ю. А. Пироженко, Е. А. Новикова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 4. С. 50–66. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-50-66>

Поступила в редакцию 18.10.2025

Подписана в печать 16.11.2025

Опубликована 26.12.2025

On some aspects of digitalization of educational process management

Viktor L. Akapiev¹, Alexander V. Borisenco¹✉,
Yuriii A. Pirozhenko¹, Ekaterina A. Novikova¹

¹ Belgorod Law Institute of Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation named after I. D. Putilin
71 Gorky Str., Belgorod 308024, Russian Federation

✉ e-mail: belui@mvrd.ru

Abstract

The purpose of research. Digitalization of all spheres of applied activity has become a prerequisite not only for the development, but also for the existence of a modern society, the functioning of which is ensured by the conditions for making effective managerial decisions. In the era of cloud computing, Big Data, and social media, complex management information processing is becoming a trend in various industries.

An obligatory structural element determining the viability of state and social structures is the system of training and education of the younger generation. The higher education system acts as the basis for training specialists in demand by the market, therefore, the higher education management system is obliged to actively innovate and optimize, change traditional models and methods, create an effective education management system taking into account the specifics of the modern generation and the need for universities to solve educational problems in the context of the formation of a single information space implemented using automated information systems.

The purpose of the research is to analyze the process of digitalization of the university's educational process management based on the use of an information system for automating the educational process. To achieve this goal, it is necessary to analyze the positive aspects of digitalization, identify negative aspects and formulate proposals for their elimination.

Methods. Research methods: study of the structure and specifics of the functioning of existing digital technologies used in universities, survey method, observation, descriptive method, synthesis and analysis methods.

Results. The main hypothesis of the study is the assumption that the digital transformation of educational process management is the integration of information technology and management solutions based on a single automation system. The results of the study confirm the effectiveness of using the "APEX-VUZ" system in a specialized university. Conclusion. In the course of the conducted research, specific proposals were formulated for the modernization of the "APEX-VUZ" system in a specialized university.

Conclusion. In the course of the conducted research, specific proposals were formulated for the modernization of the "APEX-VUZ" system in a specialized university.

Keywords: higher education; information system; educational organization; educational process management; digitalization.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Akapiev V.L., Borisenco A.V., Pirozhenko Yu.A., Novikova E.A. On some aspects of digitalization of educational process management. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2025;15(4):50–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-50-66>

Received 18.10.2025

Accepted 16.11.2025

Published 26.12.2025

Введение

Несмотря на то, что история внедрения цифровых технологий в профессио-

нальную деятельность человека насчитывает не столь продолжительный период, можно отметить заметную динамику в

подходах к использованию технологий – от информатизации отдельных направлений до комплексной цифровизации всего процесса. При этом, если цифровизация производственной сферы имеет чёткие направления развития, в сфере образования возникает ряд вопросов.

Характерной особенностью системы информатизации образования является появление и использование сформированных концепций, которые имеют множество значений и интерпретаций. Однако можно выделить одну их основных тенденций развития информатизации высшего образования [1], заключающуюся в переносе приоритетов наполнения образовательной организации техническими средствами цифровизации на обеспечение образовательного процесса эффективным программным обеспечением (ПО) [2].

На данный момент можно выделить наиболее значимые проблемы обеспечения ПО вузов:

- отсутствие готовых платформенных решений для цифровизации вузов [3];
- дефицит цифровых кадров в университетах [4];
- киберугрозы;
- проблемы внедрения российских решений при замене иностранных программных продуктов [5].

Если смотреть на цифровизацию любого образовательного учреждения, станет понятно, что есть много не сильно связанных между собой областей деятельности, которые так или иначе могут быть автоматизированы. И для того, чтобы они (эти информационные системы) между собой могли общаться,

чтобы был единый процесс управления данными, необходимо нечто, называемое «интеграционной шиной» [3], обеспечивающей комплексную цифровизацию.

Представляется, что учебные заведения больше не могут полагаться на устаревшие административные системы и внедрение цифровых технологий в систему высшего образования должно в первую очередь ориентироваться на автоматизацию решения организационно-управленческих задач и планирование диспетчеризации учебного процесса [4].

Таким образом, целью исследования является анализ процесса цифровизации управления образовательным процессом вуза на базе использования информационной системы автоматизации образовательного процесса. Обеспечение информационной поддержки образовательной деятельности означает разработку адаптивной информационно-аналитической системы управления (ИАС). Эта система призвана осуществлять пошаговое планирование и поддержку деятельности структурных подразделений вуза, что позволит организовать тесное сотрудничество между заинтересованными сторонами и будет поддерживать стратегию развития учебного заведения. Подобного рода информационная система управления способна играть важную роль в организации учебного процесса, научных исследованиях, формировании у персонала вуза необходимого уровня информационно-технологической компетентности [5], социальных услугах и внешней коммуникации [6].

Материалы и методы

Информационно-аналитические системы управления вузов

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что ИАС должны обладать достаточно широким функционалом,

поддерживающим весь жизненный цикл вуза, и при этом быть интуитивно понятными для обычных пользователей. Описание наиболее популярных систем, используемых отечественными вузами, представлено ниже (табл. 1).

Таблица 1. Примеры ИАС, которые нашли свое применение в вузах России

Table 1. Examples of IAS that have found their application in Russian universities

Название системы / Name of the system	Назначение / Appointment	Функциональность и модули / Functionality and modules	Примечания / Notes
Expasys BI (для вузов) [7]	Аналитическая платформа для принятия управленческих решений на основе данных	Конструктор форм сбора данных. Бизнес-аналитика. Базовая статистическая информация. Искусственный интеллект и машинное обучение	Доступны инструменты импорта и экспорта форм в формате JSON. Позволяет подключать внешние базы данных
1С: Университет ПРОФ [8]	Комплексная информационная система управления высшим учебным заведением	Автоматизация приёма в вуз. Планирование учебного процесса. Расчёт и распределение учебной нагрузки. Управление контингентом студентов. Администрирование и др.	В редакцию 2.2 встроен автоматический контроль легальности использования и обновления конфигурации
Naumen KMS [9]	Решение для создания единой базы знаний в компании	Модульное управление учебным процессом: кадры, расписание, приёмная кампания	Замена Confluence, SharePoint, Notion и аналогов, включая интеграции с Jira и Jira Service Desk
АИАС «Аверс: Мониторинг» [10]	Решение для реализации функций Электронного правительства, инструмент для сбора и обработки любой нерегламентированной отчетности	Получение данных в режиме реального времени, просмотр электронных паспортов образовательных организаций, контроль сбора данных, аналитическая обработка данных	Российский B2B-маркетплейс корпоративного ПО

Окончание табл. 1 / Table 1 (ending)

Название системы / Name of the system	Назначение / Appointment	Функциональность и модули / Functionality and modules	Примечания / Notes
Платформа ГИС СЦОС [11]	Централизованная государственная система мониторинга вузов	Повышение узнаваемости и репутации учебного заведения, упрощение электронного документооборота, мониторинг успеваемости студентов и др.	Требует подключения и адаптации данных вузом
Платформа «Апекс-вуз» [12; 13]	Комплексная система автоматизации образовательного процесса	Составление и проверка учебных планов, создание и контроль методических материалов, расчет и учет нагрузки, планирование расписания учебных занятий	Используется в подведомственных вузах МВД России. Реализована интеграция с системой Moodle
Платформа iSpring Online [14]	Экосистема для создания онлайн-курсов	Разработка учебных материалов, пошаговые программы обучения, календарь	Платформа поддерживает любые форматы контента: текст, аудио, видео
СДО «eLearning Server» [15]	Модульная программная образовательная платформа	Регистрация учебных курсов, создание дидактических элементов, формирование расписания, подготовка отчетов	Веб-ориентирован и не требует установки дополнительного программного обеспечения
Платформа Eliademy [16]	Многофункциональная платформа, предназначенная для конструирования онлайн-курсов	Статистика, аналитические данные	Онлайн-сервис массовых образовательных онлайн-курсов (МООК)
Среда электронного обучения 3KL [17]	Российская платформа для организации ЭИОС в вузе	Интеграция с ЭБС, электронные задания с оцениванием, журнал успеваемости и посещаемости, итоговая ведомость, зач. книжка	Поддерживает популярные форматы электронных курсов SCORM, AICC, IMS, LTI

Наличие значительного количества АИС [18], отличия пользовательских интерфейсов, информационная несовместимость внутренних и внешних контуров создают значительные препятствия на пути цифровизации высшего образования и требуют внедрения оптимальной общероссийской платформы электронного обучения.

Несмотря на активный интерес ученых к рассматриваемой проблематике и значительное количество публикаций [19], ряд ключевых аспектов требует уточнения и более широкого раскрытия. Так, в отдельном анализе нуждаются трудности разработки и внедрения ИАС, которые связаны с миграцией данных и адаптацией пользователей. Кроме того,

дополнительного освещения требуют вопросы правильного определения основных наборов данных, необходимых для эффективного функционирования ИАС.

Во исполнение распоряжения МВД России от 25.01.2023 г. № 1/649 (с изм. от 05.10.2023 г.) «Об утверждении Ведомственной программы цифровой трансформации МВД России на 2023–2025 годы» в качестве ИАС для вузов Министерства внутренних дел Российской Федерации предложена система «Апекс-вуз», которая обеспечивает переход на качественно новый уровень комплексной цифровизации и автоматизации деятельности образовательной организации.

Использование системы «Апекс-вуз»

Апекс-вуз – это комплексная система автоматизации образовательного про-

цесса, построенная на современных web-технологиях. В свою очередь, термин «web-технологии» означает совокупность инструментов, языков, протоколов и систем, необходимых для создания, представления и использования веб-сайтов и приложений в сети Интернет.

Стоит подробно остановиться на ряде позитивных аспектов внедрения системы «Апекс-вуз» в образовательные организации системы МВД России с точки зрения пользователя с правами доступа преподавателя кафедры.

1. Автоматизация доступа к расписанию учебных занятий. До внедрения системы «Апекс-ВУЗ» преподавателю, чтобы найти свои учебные занятия в расписании учебных занятий, необходимо было изучить содержимое документов Excel в папке «Расписание занятий», расположенной в локальной вычислительной сети (ЛВС) института (рис. 1).

 Квалификационный экзамен курсантов	09.09.2025 11:28	Папка с файлами
 1122,1222 ПОНБ	30.09.2025 14:48	Лист Microsoft Ex...
 1123,1223 ПОНБ	01.10.2025 10:27	Лист Microsoft Ex...
 1124,1224,1324 ПОНБ	30.09.2025 15:52	Лист Microsoft Ex...
 1125,1225 ПОНБ	29.09.2025 10:40	Лист Microsoft Ex...
 2122, 2222, 3222, 3322 4 курс АДП	06.10.2025 13:51	Лист Microsoft Ex...
 2123, 2223, 3123 3 курс ОРД	01.10.2025 10:34	Лист Microsoft Ex...
 2124, 2424, 3124, 3224 2 курс ОРД	30.09.2025 17:52	Лист Microsoft Ex...
 2125,2225,2325,3125 ОРД	01.10.2025 15:34	Лист Microsoft Ex...
 2224, 2324, 3324, 3424 2 курс АДП	26.09.2025 12:59	Лист Microsoft Ex...
 2322, 2422, 3122 4 курс ОРД	06.10.2025 17:28	Лист Microsoft Ex...
 2323, 3223, 3323 3 курс АДП	01.10.2025 14:31	Лист Microsoft Ex...
 2425,2525,3225 АД	03.10.2025 14:58	Лист Microsoft Ex...

Рис. 1. Расписание занятий в ЛВС института

Fig. 1. Schedule of classes at the Institute's LAN

Такой формат расписания создает целый ряд неудобств профессорско-преподавательскому составу: необходимость просмотра каждого файла в отдельности, отсутствие удаленного доступа к расписанию занятий с внешних сетей, в т. ч. сети Интернет, отсутствие

оповещения или уведомления при внесении изменений в файлы Excel, тогда как система «Апекс-вуз» позволяет круглосуточно получать доступ к расписанию учебных занятий в удобном формате (рис. 2).

07.10.2025, пт

53125, Основы информатики (прп)
07.10.2025, 08:00-10:00 (142.00 заседаний в таблице информации)

Уч.Кур/Инф/Ф. Кузнецова А.В., Чеков И.А.

53625, Основы информационных технологий и кибербезопасности в деятельности органов внутренних дел Российской Федерации (Пр)
07.10.2025, 10:15-12:45 (121.00 заседаний в таблице информации и файлов: планы приказы распоряжения приложения краткое описание)

Уч.Кур/Инф/Ф. Кузнецова А.В., К.и.Борисенко А.В.

08.10.2025, ср

53125, Основы информатики (прп)
08.10.2025, 08:40-10:00 (142.00 заседаний в таблице информации)

Уч.Кур/Инф/Ф. К.и.Борисенко А.В., Чеков И.А.

24241, Естественно-научные основы противодействия незаконному обороту наркотиков (Пр)
08.10.2025, 12:45-15:00 (142.00 заседаний в таблице информации и файлов: планы приказы распоряжения приложения)

Уч.Кур/Инф/Ф. Кузнецова А.В., К.и.Борисенко А.В.

09.10.2025, чт

52725, Основы информационных технологий и кибербезопасности в деятельности органов внутренних дел Российской Федерации (Зач.)
09.10.2025, 08:40-10:00 (142.00 заседаний в таблице информации)

Уч.Кур/Инф/Ф. Кузнецова А.В.

Рис. 2. Расписание занятий в системе «Апекс-вуз» (1)

Fig. 2. Schedule of classes in of the "Apex-Vuz" system (1)

Теперь становится удобно просматривать расписание каждого преподавателя кафедры в отдельности, что позволяет оперативно проверять расписание учебных занятий преподавателей

кафедры, которые отсутствуют по уважительным причинам (отпуск, временная нетрудоспособность и т. д.) для оперативного осуществления замен (рис. 3).

29.09.2025, пн - 05.10.2025, вс

сессия	группа	занятие	дисциплина	вид занятия	аудитория	преподаватель	
19	52225	08:40-10:00	Основы информационных технологий и кибербезопасности в деятельности органов внутренних дел Российской Федерации (Зач.)	Практическое занятие	Уч.Кур/Инф/Ф.	Кузнецова А.В.	
						10:15-12:45	Кузнецова А.В.
						14:00-15:30	Кузнецова А.В.
20	52225	12:45-15:00	Основы информационных технологий и кибербезопасности в деятельности органов внутренних дел Российской Федерации (Зач.)	Практическое занятие	Уч.Кур/Инф/Ф.	Кузнецова А.В.	
						15:00-17:30	Кузнецова А.В.
						17:45-19:15	Кузнецова А.В.

Рис. 3. Расписание занятий в системе «Апекс-вуз» (2)

Fig. 3. Schedule of classes in of the "Apex-Vuz" system (2)

2. Удобная реализация модуля «Методическое обеспечение» позволяет размещать и хранить рабочие программы на едином информационном ресурсе за каждый учебный год и иметь к ним доступ с персонального компьютера, под-

ключенного к сети Интернет (рис. 4, а). Ввод информации в рабочих программах в виде форм для заполнения позволяет интуитивно и быстро заполнять соответствующие графы (рис. 4, б).

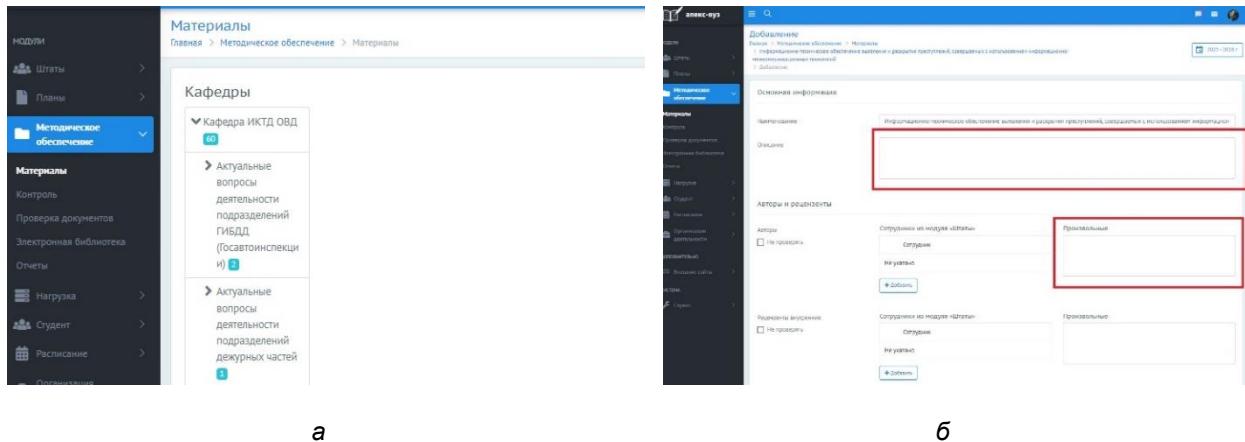


Рис. 4. Модуль «Методическое обеспечение» раздела «Материалы» системы «Апекс-вуз» (1)

Fig. 4. Module "Methodological support" section "Materials" of the "Apex-Vuz" system (1)

Отдельно хочется отметить возможность копирования и связывания рабочих программ по разным направлениям

для того, чтобы сэкономить время ввода информации по схожим рабочим программам (рис. 5).

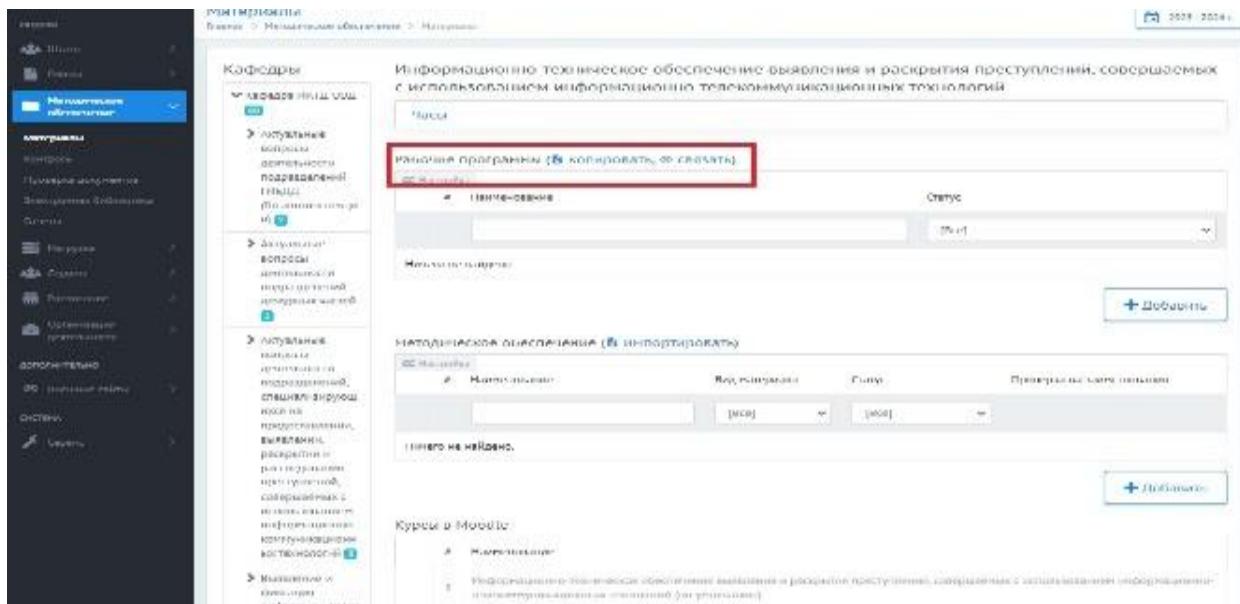


Рис. 5. Модуль «Методическое обеспечение» раздела «Материалы» системы «Апекс-вуз» (2)

Fig. 5. Module "Methodological support" section "Materials" of the "Apex-Vuz" system (2)

Вопросы при заполнении и использовании модулей «Методическое обеспечение» и «Студент»

Вместе с тем, с точки зрения пользователя, с правами преподавателя возникли и некоторые вопросы при заполнении и использовании модулей «Методическое обеспечение» и «Студент», а именно:

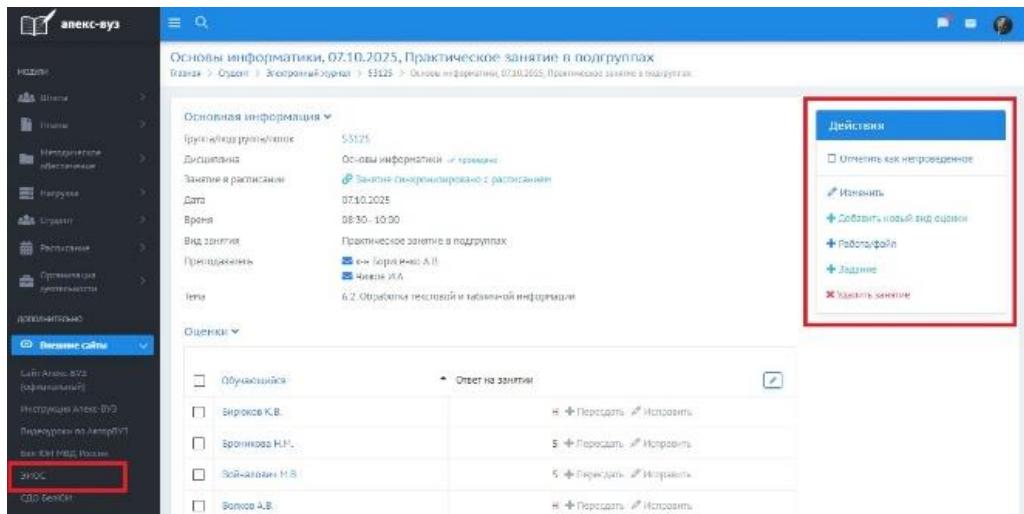


Рис. 6. Модуль «Студент» системы «Апекс-вуз» (1)

Fig. 6. Module «Student» of the "Apex-Vuz" system (1)

2. Создание дополнительного уведомления о внесенных рабочих программах при редактировании соответствующего учебного плана. Утвержденные рабочие программы в модуле «Методическое обеспечение» имеет статус «Р»

1. Ввод системы контроля знаний в виде тестирования непосредственно в «Апекс-вуз».

В модуле *Студент* имеется возможность добавлять задания для обучающихся, однако создания тестовых форм контроля знаний не предусмотрено (рис. 6).



Рис. 7. Модуль «Методическое обеспечение» раздела «Материалы» системы «Апекс-вуз» (3)

Fig. 7. Module "Methodological support" section "Materials" of the "Apex-Vuz" system (3)

При установке отметки «СОГЛАСОВАНО» рабочая программа отмечена в «Апекс-вузе» как заполненная, появляется статус буква «Р» без утверждения рабочей программы.

3. Реализация запрета утверждения рабочих программ, если по результатам проверки имеются ошибки в разделе «Тематический план». В модуле

«Методическое обеспечение» раздела «Материалы» имеется возможность осуществления проверки введенных данных (рис. 8). В то же время, если часы в разделе тематический план рабочей программы учебной дисциплины не соответствуют часам из учебного плана, данную рабочую программу можно согласовывать и утверждать.

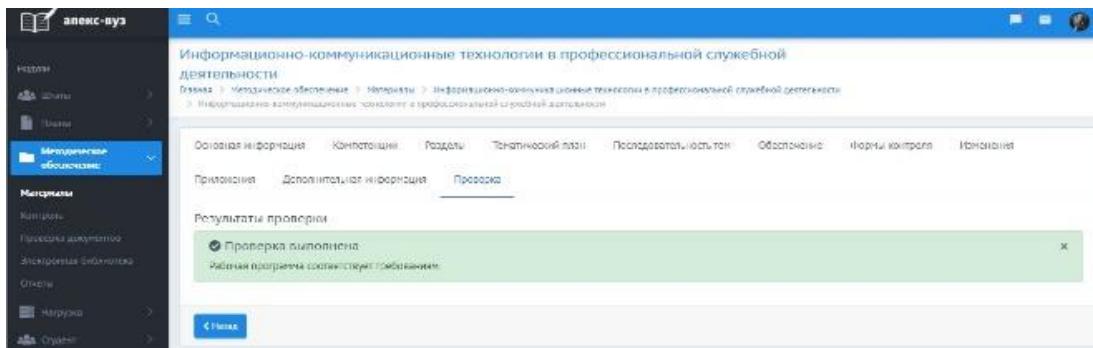


Рис. 8. Модуль «Методическое обеспечение» раздела «Материалы» системы «Апекс-вуз» (4)

Fig. 8. Module "Methodological support" section "Materials" of the "Apex-Vuz" system (4)

4. Реализация возможности поиска академической задолженности в модуле «Студент» раздел «Долги» по фамилии обучающегося.

Для исправления задолженностей по причине пропуска учебных занятий в модуле «Студент» имеется раздел

«Долги». Система «Апекс-вуз» предла-
гает осуществлять поиск по следующим
критериям: дате, группе, дисциплине,
кафедре, преподавателю и типу задол-
женности (рис. 9). Однако для поиска
конкретного обучающегося критерия
нет.

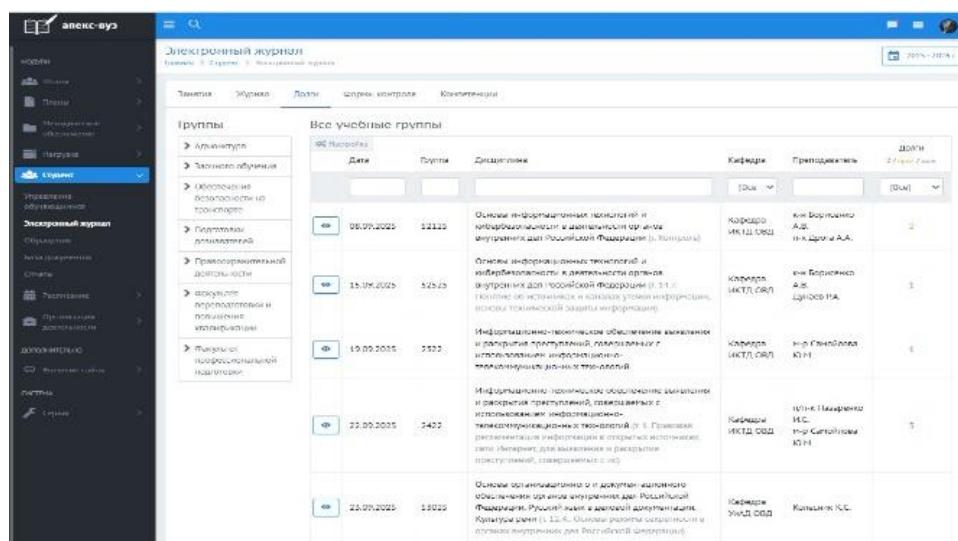


Рис. 9. Модуль «Студент» системы «Апекс-вуз» (2)

Fig. 9. Module "Student" of the "Apex-Vuz" system (2)

Результаты и их обсуждение

Предложения по совершенствованию АИС

Таким образом, предлагаются следующие возможные варианты совершенствования системы «Апекс-вуз» для разработчика:

1. Внедрить тестовые формы контроля знаний в систему «Апекс-вуз».
2. Добавить статус объекта в модуле «Методическое обеспечение», чтобы при редактировании учебного плана сотрудниками учебного отдела введенные преподавателями рабочие программы в модуле «Методическое обеспечение» не исчезали, а отображались как внесенные, но с которыми в данный момент нельзя работать.
3. Запретить утверждать рабочую программу, если по результатам проверки имеются ошибки в разделе «Тематический план».
4. Добавить критерий «Фамилия обучающегося» в модуле «Студент» раздел «Долги».

В процессе использования любой информационной системы важным аспектом является сохранение данных от модификации или утери вследствие ошибочных действий пользователей, повреждений из-за вмешательства вредоносного программного обеспечения или сбоя оборудования. Одним из способов защиты от безвозвратной утери данных является создание резервных копий и хранение их отдельно от оригинала.

Система обеспечения образовательного процесса «Апекс-вуз» имеет встроенный функционал по созданию резервных копий (рис. 10), который включает в себя планировщик заданий, позволяющий настроить тип резервной копии, периодичность и время создания копий. Однако на данный момент не реализован механизм подключения внешних (сетевых) источников хранения данных для перемещения созданных резервных копий, чтобы исключить модификацию информации вследствие выхода из строя оборудования, на котором развернута информационная система.

#	Тип	Время начала	Время окончания	Продолжительность	Статус
1	Полная копия	3 окт. 2025 г., 02:00:02	3 окт. 2025 г., 02:15:02	15 минут	✓ Завершена Файл: 20251003_020002_73605137.zip, 6,6 ГиБ
2	Полная копия	26 сент. 2025 г., 02:00:03	26 сент. 2025 г., 02:14:25	14 минут, 22 секунды	✓ Завершена Файл: 20250926_020003_76315703.zip, 6,93 ГиБ
3	Полная копия	19 сент. 2025 г., 02:00:02	19 сент. 2025 г., 02:14:25	14 минут, 23 секунды	✓ Завершена Файл: 20250919_020002_57997677.zip, 6,93 ГиБ

Рис. 10. Резервное копирование

Fig. 10. Backup

Кроме того, в данный момент в системе «Апекс-вуз» отсутствуют механизмы, позволяющие контролировать целостность и полноту создаваемых резервных копий. В процессе функционирования информационной системы объем накапливаемых данных должен расти со

временем, тем самым увеличивая объем создаваемых резервных копий. Но если построить график (рис. 11), на котором продемонстрирован объем ежедневных резервных копий, то заметно резкое снижение объема резервной копии, которая была создана 3 октября 2025 г.

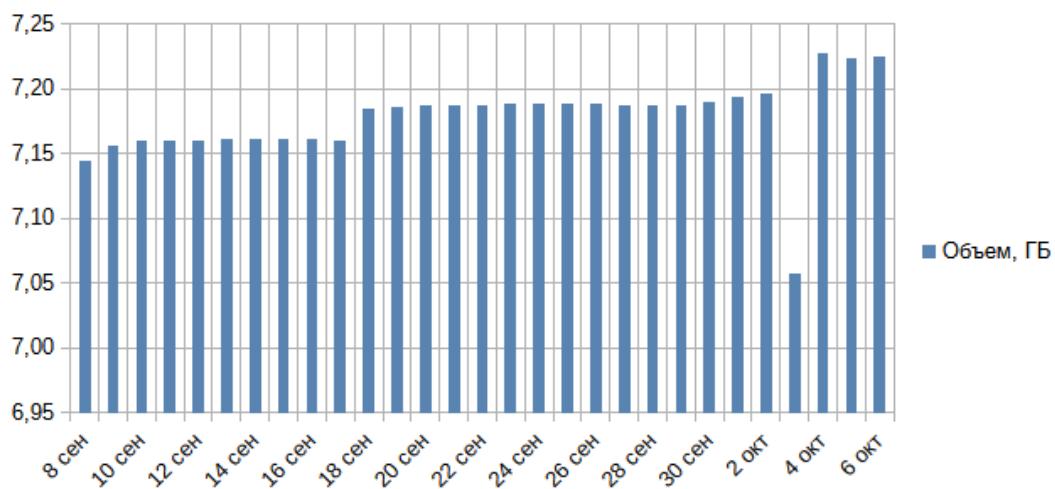


Рис. 11. График изменения объема ежедневных резервных копий

Fig. 11. Graph of changes in the volume of daily backups

Отсутствие информации в открытом доступе о механизмах функционирования информационной системы не позволяет администратору в полной мере оценить критичность утраты такого объема информации в данной конкретной резервной копии.

Не менее важной задачей, которая стоит перед администратором, является проверка возможности восстановления функционирования информационной системы из резервной копии. Данная задача может состоять из таких этапов, как:

- 1) выделение процессорных мощностей для организации стенда;
- 2) подготовка операционной системы и дополнительного программного обеспечения;
- 3) подготовка основы информационной системы;

4) восстановление наполнения информационной системы из резервной копии;

5) валидация восстановленных данных [20].

Если рассматривать данные этапы в разрезе использования информационной системы «Апекс-вуз», то первые четыре этапа у администратора не могут вызывать каких-либо трудностей. Технические требования к выделяемым мощностям невысокие, подготовка операционной системы и дополнительного программного обеспечения подробно описаны в руководстве по установке и настройке системы с применением предоставляемого скрипта, восстановление из резервной копии выполняется средствами самой информационной системы на этапе установки. Этап

валидации восстановленных данных с некоторым эталоном информационной системой не предусмотрен. Как правило, создание резервной копии выполняется в период наименьшей нагрузки на информационную систему в «нерабочее» время. К моменту проверки резервной копии на стенде состояние информационной системы может измениться и сопоставление состояния стенда и рабочей системы не имеет смысла [21].

В качестве решения данной проблемы стоит рассмотреть добавление к создаваемой резервной копии файла-манифеста, который будет содержать информацию о полном пути, имени и контрольные суммы копируемых файлов. При этом алгоритм подсчета контрольных сумм может быть любым: от md5sum для быстродействия до sha256sum для надежности. Не стоит забывать и о копии базы данных.

Для проверки целостности следует сохранить результат запроса, который подсчитывает количество записей в ключевых таблицах и считает их контрольные суммы. После восстановления базы данных необходимо выполнить

такой же запрос и сравнить с сохраненным результатом. При этом основные файлы и ключевые таблицы для создания файла-манифеста могут быть определены разработчиком программного обеспечения в виде рекомендаций по созданию дополнительной системы резервного копирования средствами операционной системы.

Выводы

На основании проведенного исследования можно сделать заключение, что основным трендом цифровизации управления образовательным процессом вуза является использование комплексной системы автоматизации образовательного процесса (АИС). По итогам проведенного анализа результатов практического применения, с точки зрения пользователя с правами доступа преподавателя кафедры, проанализировано использование системы «Апекс-вуз» в Белгородском юридическом институте МВД России имени И. Д. Путилина. Отмечены положительные моменты, выявлены недостатки и сформулированы желания по модернизации системы.

Список литературы

1. Левицкий М. Л., Гриншкун В. В., Заславская О.Ю. Тенденции и особенности современного этапа информатизации высшей школы // Вестник РУДН. Серия: Информатизация образования. 2022. № 4. С. 285–299. EDN WYGLCZ
2. Сравнение платформенного и экосистемного подходов в целях цифровой трансформации высших учебных заведений / Е. А. Толмачева, С. А. Фризен, А. Г. Изотова, Е. С. Гаврилюк // Информатизация в цифровой экономике. 2025. Т. 6, № 1. С. 175–196. <https://doi.org/10.18334/ide.6.1.123010>. EDN XUWLMM
3. Маматова Г. Д., Кучкаров Т. С. Актуальность концепции «Цифровой университет»: литературный обзор отечественных и зарубежных исследований // Информатика. Экономика. Управление. 2024. Т. 3, № 1. С. 0101–0158. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2024-3-1-0101-0158>. EDN NTUVEZ
4. Хайрутдинов Р. Р. О тенденциях развития высшего образования в России // Глобальная экономика и образование. 2021. Т. 1, № 1. С. 71–78. EDN MBZSQH

5. Акапьев В. Л., Савотченко С. Е. Организационно-правовые проблемы организации электронного обучения в процессе формировании профессиональных компетентностей // Право и образование. 2024. № 5. С. 4–14. EDN OEGDFI
6. Панарина С. Н., Сапожникова А. В., Яковлева Н. Л. Моделирование информационной системы сопровождения образовательного процесса вуза // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2022. № 5 (223). С. 47–57. <https://doi.org/10.23951/1609-624X-2022-5-47-57>
7. Шамаева А. А., Павлов В. А. Визуализация данных в образовании с помощью российских BI-платформ // Вестник науки. 2024. Т. 5, № 12 (81). С. 359–364.
8. Конева А. А. Внедрение автоматизированной информационной системы 1С. Университет: Образовательные программы // Наука и образование транспорту. 2021. № 2. С. 317–319. EDN LJFFRV
9. Батунова И. В., Кокорина С. В., Чан Т. Т. Х. Интеграция цифровизации в образовательный процесс // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 7 (145). С. 116. <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.97>
10. Смирнов В. М., Ларин М. С. Новые информационные технологии в образовании // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 30. С. 285–290. EDN ONEYER
11. Сачков Д. И., Шишкин Ю. Н., Шедиков А. А. Создание единого технологического решения автоматизации деятельности образовательных организаций // Baikal Research Journal. 2024. Т. 15, № 1. С. 205–213. [https://doi.org/10.17150/2411-6262.2024.15\(1\).205-213](https://doi.org/10.17150/2411-6262.2024.15(1).205-213). EDN TBGQWM
12. Зык А. В. Разработка и использование виртуального учебно-методического кабинета в образовательной деятельности института // Научный дайджест Восточно-Сибирского института МВД России. 2021. № 3. С. 194–199. EDN LPHUOB
13. Гаврилова О. В., Лантух Э. В., Смольяков А. А. Актуальные вопросы обеспечения учебного процесса в рамках электронной информационной образовательной среды // Психолого-педагогические проблемы безопасности человека и общества. 2022. № 1. С. 48–52. EDN CLVOPU
14. Gordillo A., Barra E., Quemada J. SGAME: An authoring tool to easily create educational video games by integrating SCORM-compliant learning objects // Ieee Access. 2021. Vol. 9. P. 126414–126430.
15. Горбачева С. С. Педагогический дизайн как средство эффективной организации магистерской подготовки психолого-педагогической направленности // Известия Воронежского государственного педагогического университета. 2021. № 2. С. 80–84. https://doi.org/10.47438/2309-7078_2021_2_80
16. Сизова Ю. С., Ульянова П. Д. Направления развития российской системы дистанционного образования в условиях цифровизации // Современное педагогическое образование. 2023. № 4. С. 170–176. EDN QYFTRE
17. Луц С. С., Антильева И. А. Опыт интеграции электронной образовательной среды в образовательный процесс (на примере российских вузов) // Baikal Research Journal. 2024. Т. 15, № 2. С. 713–727. [https://doi.org/10.17150/2411-6262.2024.15\(2\).713-727](https://doi.org/10.17150/2411-6262.2024.15(2).713-727). EDN BAABAO
18. Железняк С. П., Сидорова Е. А., Саля И. Л. Организация автоматизированной информационной системы тестирования знаний // Цифровая экономика. 2023. № 4. С. 25.

19. Сороко Г. Я., Коршаков Ф. Н., Коготкова И. З. Развитие цифровых технологий управления вузом: опыт и перспективы // Университетское управление: практика и анализ. 2024. Т. 28, № 3. С. 45–55. <https://doi.org/10.15826/umpa.2024.03.024>
20. Dynamic response recovery of damaged structures using residual learning enhanced fully convolutional network / Q. Tang, J. Xin, Y. Jiang, H. Zhang, J. Zhou // International Journal of Structural Stability and Dynamics. 2025. N 25(01). P. 2550008. <https://doi.org/10.1142/S0219455425500087>
21. Distributed neural tensor completion for network monitoring data recovery / C. Liu, K. Xie, T. Wu, C. Ma, T. Ma // Information Sciences. 2024. N 662. P. 120259. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2024.120259>

References

1. Levitsky M.L., Grinshkun V.V., Zaslavskaya O.Yu. Trends and features of the modern stage of informatization of higher education. *Vestnik RUDN. Seriya: Informatizatsiya obrazovaniya = Vestnik RUDN. Series: Informatization of Education.* 2022;(4):285–299. (In Russ.) EDN WYGLCZ
2. Tolmacheva E.A., Frizen S.A., Izotova A.G., Gavrilyuk E.S. Comparison of platform and ecosystem approaches for the digital transformation of higher education institutions. *Informatizacija v cifrovoj jekonomike = Informatization in the Digital Economy.* 2025;6(1):175–196. (In Russ.) <https://doi.org/10.18334/ide.6.1.123010>. EDN XUWLM
3. Mamatova G.D., Kuchkarov T.S. The relevance of the concept of "Digital University": a literary review of domestic and foreign studies. *Informatika. Jekonomika. Upravlenie = Informatics. Economics. Management.* 2024;3(1):0101–0158. (In Russ.) <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2024-3-1-0101-0158>. EDN NTUVEZ
4. Khairutdinov R.R. Trends in the development of higher education in Russia. *Global'naja jekonomika i obrazovanie = Global Economy and Education.* 2021;1(1):71–78. (In Russ.) EDN MBZSQH
5. Akap'ev V.L., Savotchenko S.E. Organizational and legal problems of e-learning organization in the process of professional competence formation. *Pravo i obrazovanie = Law and Education.* 2024;(5):4–14. (In Russ.) EDN OEGDFI
6. Panarina S.N., Sapozhnikova A.V., Yakovleva N.L. Modeling of the information system for supporting the educational process of a university. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta = Bulletin of Tomsk State Pedagogical University.* 2022;5(223):47–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.23951/1609-624X-2022-5-47-57>
7. Shamaeva A.A., Pavlov V.A. Data visualization in education using Russian BI platforms. *Vestnik nauki = Bulletin of Science.* 2024;5(12):359–364. (In Russ.)
8. Koneva A.A. Introduction of the automated information system 1C. University: Educational programs. *Nauka i obrazovanie transportu = Science and Education for Transport.* 2021;(2):317–319. (In Russ.) EDN LJFFRV
9. Batunova I.V., Kokorina S.V., Chan T.T.H. Integration of digitalization into the educational process. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal = International Scientific Research Journal.* 2024;(7):116. (In Russ.) <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.97>

10. Smirnov V.M., Larin M.S. New information technologies in education. *Innovacii. Nauka. Obrazovanie = Innovations. Science. Education.* 2021;(30):285–290. (In Russ.) EDN ONEYER
11. Sachkov D.I., Shishkin Yu.N., Shedikov A.A. Creation of a unified technological solution for automation of educational organizations. *Baikal Research Journal.* 2024; 15(1): 205-213. (In Russ.) [https://doi.org/10.17150/2411-6262.2024.15\(1\).205-213](https://doi.org/10.17150/2411-6262.2024.15(1).205-213). EDN TBGQWM
12. Zyk A.V. Development and use of a virtual teaching and methodological cabinet in the educational activities of the Institute. *Nauchnyj dajdzhest Vostochno-Sibirskogo instituta MVD Rossii = Scientific Digest of the East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia.* 2021;(3):194–199. (In Russ.) EDN LPHUOB
13. Gavrilova O.V., Lantukh E.V., Smolyakov A.A. Actual issues of ensuring the educational process in the framework of the electronic information educational environment. *Psichologo-pedagogicheskie problemy bezopasnosti cheloveka i obshhestva = Psychological and Pedagogical Problems of Human and Society Security.* 2022;(1):48–52. (In Russ.) EDN CLVOPU
14. Gordillo A., Barra E., Quemada J. SGAME: An authoring tool to easily create educational video games by integrating SCORM-compliant learning objects. *Ieee Access.* 2021;9:126414–126430.
15. Gorbacheva S.S. Pedagogical design as a means of effective organization of master's degree training in psychological and pedagogical orientation. *Izvestija Voronezhskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta = Proceedings of the Voronezh State Pedagogical University.* 2021;(2):80–84. (In Russ.) https://doi.org/10.47438/2309-7078_2021_2_80
16. Sizova Yu.S., Ulyanova P.D. Directions of development of the Russian distance education system in the context of digitalization. *Sovremennoe pedagogicheskoe obrazovanie = Modern Pedagogical Education.* 2023;(4):170–176. (In Russ.) EDN QYFTRE
17. Lutz S.S., Antipyeva I.A. The experience of integrating the electronic educational environment into the educational process (on the example of Russian universities). *Baikal Research Journal.* 2024;15(2):713–727. (In Russ.) [https://doi.org/10.17150/2411-6262.2024.15\(2\).713-727](https://doi.org/10.17150/2411-6262.2024.15(2).713-727). EDN BAABAO
18. Zheleznyak S.P., Sidorova E.A., Salya I.L. Organization of an automated knowledge testing information system. *Cifrovaja jekonomika = Digital Economy.* 2023;(4):25. (In Russ.)
19. Soroko G.Y., Korshakov F.N., Kogotkova I.Z. Development of digital technologies of university management technologies: experience and prospects. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz = University Management: Practice and Analysis.* 2024;28(3):45–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.15826/umpa.2024.03.024>
20. Tang Q., Xin J., Jiang Y., Zhang H., Zhou J. Dynamic response recovery of damaged structures using residual learning enhanced fully convolutional network. *International Journal of Structural Stability and Dynamics.* 2025;(25):2550008. <https://doi.org/10.1142/S0219455425500087>
21. Liu C., Xie K., Wu T., Ma C., Ma T. Distributed neural tensor completion for network monitoring data recovery. *Information Sciences.* 2024;(662):120259. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2024.120259>

Информация об авторах / Information about the Authors

Акапьев Виктор Львович, кандидат педагогических наук, доцент кафедры информационно-компьютерных технологий в деятельности органов внутренних дел, Белгородский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации имени И. Д. Путилина, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: akapevv@yandex.ru, SPIN: 6275-6804, ORCID: 0009-0001-0560-8117

Борисенко Александр Васильевич, кандидат физико-математических наук, преподаватель кафедры информационно-компьютерных технологий в деятельности органов внутренних дел, Белгородский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации имени И. Д. Путилина, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: borisenko02.94@mail.ru, SPIN: 4684-8218, ORCID: 0000-0002-2539-3096

Пироженко Юрий Анатольевич, преподаватель кафедры информационно-компьютерных технологий в деятельности органов внутренних дел, Белгородский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации имени И. Д. Путилина, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: pieibex@yandex.ru

Новикова Екатерина Анатольевна, кандидат юридических наук, начальник кафедры информационно-компьютерных технологий в деятельности органов внутренних дел, Белгородский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации имени И. Д. Путилина, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: tomchik1980@mail.ru, SPIN: 3557-6819, ORCID: 0000-0002-6572-7732

Viktor L. Akap'yev, Candidate of Sciences (Pedagogogy), Associate Professor at the Department of Information and Computer Technologies in the Activities of Internal Affairs Bodies, Belgorod Law Institute of Ministry of Internal of the Russian Federation named after I. D. Putilin, Belgorod, Russian Federation, e-mail: akapevv@yandex.ru, SPIN-code: 6275-6804, ORCID: 0009-0001-0560-8117

Alexander V. Borisenko, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Lecturer at the Department of Information and Computer Technologies in the Activities of Internal Affairs Bodies, Belgorod Law Institute of Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation named after I. D. Putilin, Belgorod, Russian Federation, e-mail: borisenko02.94@mail.ru, SPIN: 4684-8218, ORCID: 0000-0002-2539-3096

Yuri A. Pirozhenko, Lecturer at the Department of Information and Computer Technologies in the Activities of Internal Affairs Bodies, Belgorod Law Institute of Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation named after I. D. Putilin, Belgorod, Russian Federation, e-mail: pieibex@yandex.ru

Ekaterina A. Novikova, Candidate of Sciences (Jurisprudence), Head of the Department of Information and Computer Technologies in the Activities of the Department of Internal Affairs Bodies, Belgorod Law Institute of Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation named after I. D. Putilin, e-mail: tomchik1980@mail.ru, SPIN: 3557-6819, ORCID: 0000-0002-6572-7732

Метод и алгоритмы управления группировкой наноспутников

Е. А. Титенко¹✉, Е. А. Шиленков¹, С. Н. Фролов¹, В. П. Соглаев¹,
Д. П. Тетерин¹, О. И. Атакищев²

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Институт инженерной физики
Большой Ударный пер., д. 1А/1, Московская область, г. Серпухов 142210, Российская Федерация

✉ e-mail: johntit@mail.ru

Abstract

Целью исследования является поиск путей повышения эффективности работы группировки (сети) наноспутников в условиях пополнения и выбывания космических аппаратов в процессе эксплуатации на орбите на основе самоорганизующейся mesh-сети, в которых маршрутизация осуществляется динамически на основе связности элементов сети.

Методы исследования основаны на методах системного анализа, принятия решений и принципах децентрализованного управления, предназначенных для сети наноспутников самостоятельно менять свою конфигурацию под изменяющиеся условия работы и требования решаемой задачи. Используя свойства методов самоорганизации и адаптивного управления (распределенность и восприимчивость к изменениям), группировка наноспутников поддерживает конфигурацию аппаратов, способных обмениваться между собой данными и служебной информацией. Разработан двухуровневый метод реконфигурации сети, позволяющий упреждающе изменять состав наноспутников на основе ретроспективных данных оценки качества и уровня передаваемых сигналов. Разработаны алгоритмы формирования списка маршрутов и анализа маршрутов, отличающиеся возможностью автономного выполнения на каждом наноспутнике в составе группировки.

Результаты. Созданный метод реконфигурации позволяет асинхронно выполнять процессы пополнения и исключения аппаратов из сети на основе полученной или выявленой информации об их состоянии и связях между аппаратами. Показано, что децентрализованный подход отличается линейной временем сложностью для наиболее критичных алгоритмов актуализации и построения маршрутов сети.

Заключение. Созданные метод реконфигурации и алгоритмы для управления группировкой наноспутников являются основой для создания сетевого программного обеспечения, позволяющего автономно каждому аппарату принимать решения о модификации своего статуса и списка маршрутов.

Ключевые слова: mesh-сеть; самоорганизация; маршрутизация; ретроспективные данные; граф.

© Титенко Е. А., Шиленков Е. А., Фролов С. Н., Соглаев В. П., Тетерин Д. П., Атакищев О. И., 2025

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Метод и алгоритмы управления группировкой наноспутников / Е. А. Титенко, Е. А. Шиленков, С. Н. Фролов, В. П. Соглаев, Д. П. Тетерин, О. И. Атакищев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 4. С. 67–88. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-67-88>

Поступила в редакцию 07.10.2025

Подписана в печать 05.11.2025

Опубликована 26.12.2025

Method and algorithms for control of a construction of nano-satellites

**Evgeny A. Titenko¹✉, Egor A. Schilenkov¹, Sergey N. Frolov¹,
Vladislav P. Soglaev¹, Dmitry P. Teterin¹, Oleg I. Atakishchev²**

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

² Institute of Engineering Physics
1A/1 Bolshoy Udarny side-street, Moscow region, Serpukhov 142210, Russian Federation

✉ e-mail: johntit@mail.ru

Резюме

The purpose of the research is to find ways to increase the efficiency of the nanosatellite constellation (network) in the conditions of replenishment and retirement of spacecraft during operation in orbit based on a self-organizing mesh network, in which routing is carried out dynamically based on the connectivity of network elements.

Methods are based on decision-making techniques, systems analysis, and decentralized control principles, enabling a nanosatellite network to independently reconfigure itself to meet changing operating conditions and task requirements. Using the properties of self-organization and adaptive control methods (distribution and responsiveness to change), the nanosatellite constellation maintains a configuration of satellites capable of exchanging data and service information. A two-level network reconfiguration method has been developed, enabling proactive changes to the composition of nanosatellites based on historical assessments of the quality and strength of transmitted signals. Algorithms for route list generation and route analysis have been developed, which can be executed autonomously on each nanosatellite in the constellation.

Results. The developed reconfiguration method enables asynchronous addition and deletion of satellites from the network based on received or discovered information about their status and connections between satellites. It is shown that the decentralized approach has linear time complexity for the most critical algorithms for updating and constructing network routes.

Conclusion. The developed reconfiguration method and algorithms for managing a nanosatellite constellation form the basis for developing network software that allows each satellite to autonomously make decisions about modifying its status and route list.

Keywords: mesh network; self-organization; routing; historical data; graph.

Conflict of interest: The Authors declares the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Titenko E.A., Schilenkov E.A., Frolov S.N., Soglaev V.P., Teterin D.P., Atakishchev O.I. Method and algorithms for control of a construction of nano-satellites. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest*

Received 07.10.2025

Accepted 05.11.2025

Published 26.12.2025

Введение

Одним перспективных путей развития современной космонавтики в XXI в. стало создание группировок взаимодействующих наноспутников, совместно решая прикладные и исследовательские задачи [1]. Наиболее известные задачи – дистанционное зондирование космического пространства [2], радиообмен между наземными центрами и космическими аппаратами, измерение физических и энергетических характеристик ближнего космоса и др. Качество и эффективность решения таких задач зачастую определяется количеством экспериментов, одновременно проводимых на орбите [3]. Соответственно наиболее естественный путь – формирование и поддержка группировки (сети) космических аппаратов, имеющих необходимую полезную нагрузку для коллективного решения прикладных или исследовательских задач [4].

Область малой космонавтики включает наиболее массовый сегмент – малые космические аппараты (МКА) формата CubeSat 3U (наноспутники), которые проектируются и изготавливаются силами ведущих университетов и научно-технических центров [5]. Сегодня современный МКА CubeSat 3U – это автономная измерительно-исследовательская лаборатория, функционирующая на основе полетного задания и подаваемых с наземного центра управления команд на выполнение работ с помощью различных модулей полезной нагрузки и

технологии искусственного интеллекта [6]. Тем не менее риски отказа или поломки отдельных МКА в процессе эксплуатации по-прежнему остаются значимыми, поэтому сетевая структура рассматривается как инструмент их нейтрализации и одновременно повышения готовности использования группировки наноспутников [7]. Под готовностью понимается количество работоспособных спутников к общему их числу в составе группировке (сети).

Современные системы управления, особенно для однородных многоэлементных систем [8], остро нуждаются не только в централизованных механизмах и алгоритмических принципах поддержки приема-передачи, но и в средствах адаптивного прогнозирования системы и, соответственно, проведения адаптивной реконфигурации. Применение известных методов оптимизации и принятия решений для таких систем сталкивается с высокой неопределенностью и частотой изменения состояния элементов в пространстве и времени [9]. В результате формируемые правила имеют представительный набор ограничений и условий применения, время проверки которых зачастую превышает период их изменений, особенно для сети наноспутников, имеющих различные положения на орбите.

Таким образом, актуальной является задача децентрализованного управления с использованием технологии искусственного интеллекта [10] для автономного и адаптивного изменения

структуры сети под меняющиеся состояния отдельных аппаратов. Вместе с тем вопросы реконфигурации сети ограниченно рассмотрены при совмещении процессов пополнения и исключения аппаратов из сети.

В настоящее время в рамках теории принятия решений [11] можно использовать методы управления группировкой подвижных объектов (МКА):

1. Метод группового управления на основе коллективной оптимизации.
2. Метод поведенческого управления.
3. Метод группового управления на основе нечеткой логики.
4. Метод самоорганизующегося управления.
5. Метод стайного управления.

В таблице 1 показаны характеристики данных методов и их статус в каждом методе.

Таблица 1. Характеристики методов управления группировкой МКА

Table 1. Characteristics of methods for controlling a group of small spacecraft

Характеристики	Методы управления				
	метод группового управления на основе коллективной оптимизации	метод поведенческого управления	метод группового управления на основе нечеткой логики	метод самоорганизующегося управления	метод стайного управления
1. Наличие выделенного центра управления	–	–	+	–	–
2. Устойчивость к потере одного или нескольких членов группировки	+	+	–	+	+
3. Равнозначность и взаимозаменяемость объектов	+	+	–	+	–
4. Масштабируемость группировки за счет новых членов	+	+	+	+	+
5. Иерархическая структура управления	–	–	+	–	+
6. Поддержка режима передачи данных master-slave	+	–	+	–	–
7. Наличие связи с соседними членами группировки	+	–	+	+	–
8. Прогнозный характер планирования	+	+	–	+	+

Сравнение данных методов показывает, что работоспособность сети взаимодействующих МКА основывается на комбинации детерминированных и адаптивных шагов для оценки и прогнозе состояния отдельных аппаратов [12]. Формируемая по отдельности каждым аппаратом сети данная информация является основой для реконфигурации сети, проводимой на основе принципов коллективной работы и самоорганизации [13].

С системной точки зрения каждый аппарат проявляет свойства интеллектуального агента, получающего опосредованную информацию о сети и выдающего в сеть собственное состояние, что позволяет на основе волновых итерационных процессов получить устойчивое состояние сети и удерживать его при выполнении пороговых условий [14].

Целевая миссия поддержания сети в работоспособном состоянии – поддержание необходимого размера сети наноспутников, зависящего от:

- n_{fact} – имеющиеся в сети наноспутники;
- $map[n_{fact}, n_{fact}]$ – карта сети;
- n_{new} – новые наноспутники (вне сети);
- h – пороговое значение.

Тогда работа сети наноспутников определяется функцией готовности сети в виде

$$E(n_{fact}, n_{new}, map[n_{fact}, n_{new}], h) \rightarrow \max. \quad (1)$$

Материалы и методы

Рассматриваемая группировка взаимодействующих МКА представляет собой единую систему (сеть) объектов (интеллектуальных агентов), которые совместно используют расчетно-логические

и прогнозно-адаптивные подходы для своей оценки и децентрализованной реконфигурации сети [15]. Новое качество коллективной работы наноспутников проявляется за счет смешанного иерархического принципа управления:

- на верхнем уровне принцип самоорганизации проявляется в процедурах автоматического пополнения и исключения МКА из сети на основе автономных процессов обмена служебной и контекстной информацией между объектами сети;
- на нижнем уровне интеллектуальные агенты способны вести анализ состояния и генерацию прогноза, что позволяет заранее менять конфигурацию сети на основе обработки ретроспективных данных (временных рядов) качества связи и уровня сигнала.

Комплексирование расчетных и адаптивных подходов позволяет, с одной стороны, вести циклический опрос качества и уровня связи между аппаратами и служит для выявленной негативной тенденции, с другой – вновь появившиеся наноспутники на основе широковещательной рассылки и приема сообщений о своем положении и статусе инициируют процессы пополнения сети с переиндексацией аппаратов и связей между ними в сети. Тогда сеть наноспутников описывается как динамическая система, децентрализованно меняющая свой состав и связи между аппаратами в регламентные моменты времени.

Информационной основой для выполнения обменных процессов между аппаратами сети служат такие ресурсы, как:

- mesh-сеть;
- распределенная карта сети.

Mesh-сеть – это самоорганизующая сеть объектов, наделенных способностью периодически обмениваться информацией и менять свою конфигурацию на основе выполнения широковещательных рассылок и обработки множества принятых сообщений, что исключает необходимость назначения единого управляющего центра [16]. Для управления работой группировкой подвижных объектов с возможностями самостоятельного принятия решений на борту широкое распространение получили циклические опросно-управляющие сеансы связи. Они предполагают ячеистую (однородную) структуру сети и используют принципы децентрализации и автономной работы. В mesh-сетях, имеющих ячеистое строение, элементы сети объединяются многочисленными и зачастую избыточными связями. Однако такая избыточность необходима участ-

никам сети для прокладки множества маршрутов и реконфигурации сети [17].

Архитектура mesh-сетей основана на децентрализованном управлении, в ней каждый элемент сети (интеллектуальный агент) выполняет функции ретрансляции и маршрутизации, что позволяет двояко использовать их для работы с переменным составом сети [18]. С одной стороны, элемент сети входит в цепочку маршрута, обеспечивая передачу контекстной информации при решении прикладной задачи группировкой, с другой – элемент сети – активный организатор процессов реконфигурации сети, основанной на сборе данных о состоянии и переиндексации элементов сети (пополнение или удаление). Сетевая организация сети основана на формировании общих зон и задании «мостовых» элементов, через которые идет маршрутизация (рис. 1).

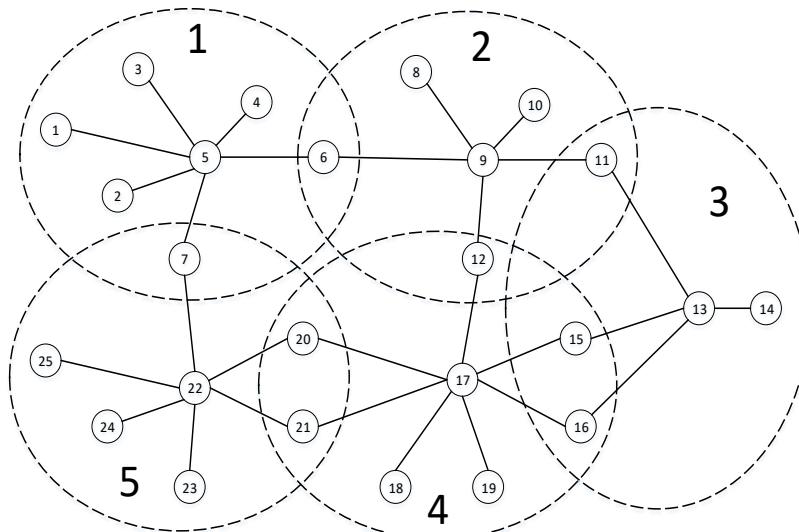


Рис. 1. Иерархическая конфигурации mesh-сети

Fig. 1. Hierarchical mesh network configuration

В mesh-сетях маршрутизация осуществляется динамически на основе данных о связности элементов сети. Объекты (элементы) сети могут подклю-

чаться и выходить из состава сети с относительно высокой частотой. При этом пополнение сети МКА не является исключительным процессом, добавление

элемента реализуется как процесс актуализации элементов сети на основе распределенной структуры данных и выполнения широковещательной рассылки сообщений объектом-инициатором [18].

Особенностью mesh-сетей является то, что новый элемент при подключении к сети может быть [19]:

- элементом-коммутатором;
- корневым узлом;
- конечным (терминальным) элементом.

Карта сети подвижных МКА – базовый информационно-управляющий ресурс сети, который описывает текущее состояние связей между аппаратами сети и является основой для ее реконфигурации силами самих аппаратов. Основанием для инициализации процесса исключения аппарата из сети и последующей реконфигурации служит анализ качества и активности связи между

$$a_{ij} = \begin{cases} C_{a_{ij}} > 0, & \text{если между } i \text{ и } j \text{ МКА имеется связь;} \\ \text{NIL}, & \text{если между } i \text{ и } j \text{ МКА не установлено связи;} \\ 0, & \text{если } i = j, \end{cases} \quad (2)$$

где $C_{a_{ij}}$ – количественная оценка связи между ij -й парой аппаратов.

Метод реконфигурации сети МКА является иерархическим, он имеет 2 уровня управления:

1) на верхнем уровне реконфигурация основана на принципах самоорганизации, т. е. коллективного выполнения элементами сети набора базовых процедур автоматического объединения, актуализации (опрос и исключение МКА), пополнения сети, что позволяет поддерживать необходимое количество работоспособных МКА в сети;

аппаратами [20]. Если ретроспектива временных данных, хранящихся в базе самого аппарата, имеет негативную тенденцию и монотонно приближается к нижнему порогу уровня связи, то такой аппарат будет исключен силами остальных участников сети в регламентные моменты времени опроса сети.

Структура сети МКА задается квадратной матрицей [21]. Каждая строка матрицы смежности по отдельности описывает текущие связи i -го МКА с остальными аппаратами ($i = 1 \dots M$). Соответственно графовое представление группировки и обработка матрицы смежности позволяют оценивать связность сети и управлять ее структурой.

Карта сети представляет из себя квадратную матрицу $A = (a_{ij})$ размерности $M \times M$, элементы которой a_{ij} определяются как

2) на нижнем уровне сеть МКА понимается как адаптивная система, имеющая доступную для всех участников предысторию их состояний, что позволяет осуществлять прогноз будущего состояния сети на основе анализа временных данных состояния связи между парами МКА в сети и прогнозировать будущие состояния каждого из МКА, входящих в сеть.

В качестве базовых операций сети МКА на верхнем уровне выполняются следующие операции:

- инициализация (образование) сети МКА;

- актуализация (опрос) МКА;
- пополнение сети МКА;
- построение списка маршрутов между аппаратами сети.

Под операцией инициализации понимается процесс информационно-физического объединения отдельных аппаратов в единую связанную систему.

Под операцией актуализации сети понимается процесс циклического адресного опроса элементов аппаратов на предмет подтверждения уровня и/или качества связи. Циклические перебор и проверка связи между парами аппаратов позволяют выявить фактические отказы и запустить алгоритм переиндексации работоспособных аппаратов с целью исключения вышедших из строя аппаратов.

Под операцией пополнения понимается процесс расширения состава группировки и изменения связей между аппаратами. Вновь прибывший аппарат осуществляет широковещательную рассылку и устанавливает связь с ответившими ему аппаратами сети. Как следствие, выполняется расширение карты сети и обновление связей между аппаратами. При этом все аппараты сети переходят в режим приема сообщений и коррекции своей карты сети по факту установления связи.

Операция построения списка маршрутов между аппаратами сети заключается в следующем. Организуется сетевая эстафета трансляции системного кода между узлами связи сети в прямом и обратном направлениях. В процессе эстафеты проверяется качество и уровень сигнала между источником и приемником системного кода. Полученные при прямом и обратном ходе по маршруту временные задержки сравниваются со

значениями в карте сети и модифицируют значения в экземплярах карты сети. В завершение всех построений текущий корневой узел выполняет одноразовую широковещательную рассылку списка построенных маршрутов.

Метод реконфигурации сети МКА включает следующие этапы:

1) проверка внешнего условия реконфигурации сети (асинхронный процесс) – обнаружение системного кода от нового аппарата, автоматическая индексация количества строк и столбцов карты сети;

2) проверка внутреннего условия реконфигурации сети (синхронный процесс) – циклическая широковещательная рассылка служебного сообщения и его прием остальными аппаратами сети, проверка связности пар МКА и обновление временных задержек в экземплярах карты сети;

3) обработка карт сети и удаление аппаратов, не принявших участия в обмене, карта сети уменьшается на число выбывших аппаратов;

4) переиндексация аппаратов сети и логическое исключение выбывших аппаратов.

Для повышения живучести сети метод реконфигурации опционально дополняется следующими шагами прогнозной реконфигурации:

1) прием аппаратами допустимого нижнего порога уровня связи h ;

2) накопление временных рядов изменения уровня и качества связи между парами аппаратов и анализ ретроспективных данных;

3) составление прогнозных правил оценки радиовидимости аппаратов и составление списка «подозрительных» на отказ аппаратов;

4) оценка внешних условий работы сети и утверждение списка аппаратов, рекомендуемых к исключению;

5) выполнение пп. 3–4 и переход к п. 10;

6) фиксация новой конфигурации сети аппаратов, обновление экземпляров карты сети и списка маршрутов МКА.

Новизна метода реконфигурации определяется децентрализованными процессами модификации сети на основе локальных данных у каждого аппарата и выполнении обменных синхронизирующих процессов, что позволяет исключить единый центр управления. При пополнении сети МКА-новичок осуществляет широковещательную рассылку не только служебного пакета, но и данных о себе

(идентификатор, координаты и др.), а аппараты сети, которые получили эти данные, самостоятельно выполняют модификацию экземпляров карты сети. После модификации аппараты сети по очереди отсылают МКА-новичку свои пакеты, что позволяет вновь вошедшему в сеть аппарату построить свою карту сети.

Интеграция двух подходов реконфигурации также позволяет повысить живучесть сети МКА за счет опроса состояния сети, обновления конфигурации сети и прогнозирования новой конфигурации сети МКА в условиях неопределенности внешней среды и будущих состояний аппаратов.

Пусть в начальный момент времени на орбиту выведено $M = 5$ МКА (рис. 2).

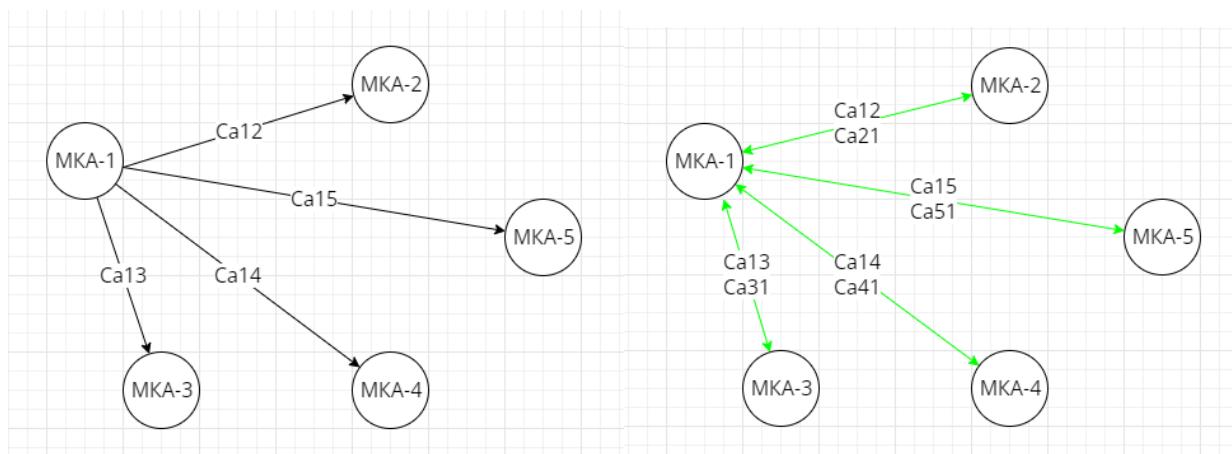


Рис. 2. Начальная рассылка и установление связей аппаратов

Fig. 2. Begin broadcast and establishment of device connections

Для инициализации сети МКА выполняется циклическая широковещательная рассылка сообщений (от МКА-1, МКА-2, МКА-3 и т. д.) и их прием (рис. 2). По факту обменных процессов построчно заполняется карта сети на основе рассчитанных задержек. Прием и передача выполняются заданное количество раз, по

итогу – в карту сети записываются средние или фиксируется отсутствие связи между парами аппаратов. Например, на рисунке 3 для широковещательной рассылки из МКА-4 не подтверждена связь МКА-4 – МКА-5, что отражается в карте сети МКА-4 значениями для $Ca_{45} = NILL$ и $Ca_{54} = NILL$ (табл. 2).

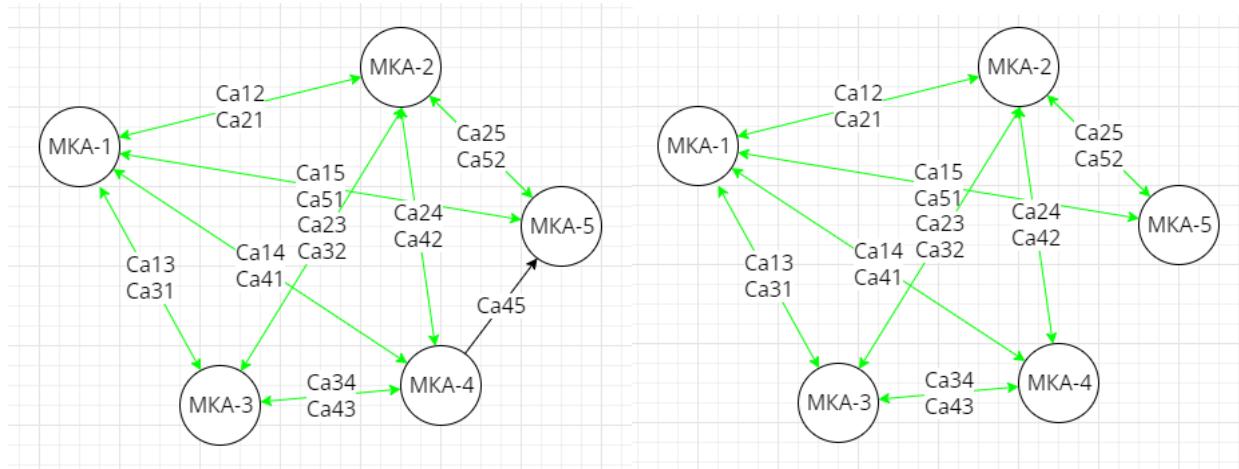


Рис. 3. Широковещательная рассылка и установление связей МКА-4

Fig. 3. Broadcast and establishment of communications between small satellites-4

Таблица 2. Карта сети МКА

Table 2. Small spacecraft network map

		Передатчик				
		МКА-1	МКА-2	МКА-3	МКА-4	МКА-5
Приемник	МКА-1	0	CA ₂₁ = 0,011	CA ₃₁ = 0,015	CA ₄₁ = 0,013	CA ₅₁ = 0,021
	МКА-2	CA ₁₂ = 0,01	0	CA ₃₂ = 0,025	CA ₄₂ = 0,011	CA ₅₂ = 0,021
	МКА-3	CA ₁₃ = 0,015	CA ₂₃ = 0,025	0	CA ₄₃ = 0,015	NIL
	МКА-4	CA ₁₄ = 0,014	CA ₂₄ = 0,010	CA ₃₄ = 0,015	0	NIL
	МКА-5	CA ₁₅ = 0,02	CA ₂₅ = 0,022	NIL	NIL	0

После инициализации, создания распределенной карты сети и списка маршрутов сеть МКА выполняет целевую работу, используя маршруты для передачи служебной и контекстной информации между МКА и наземным центром (оконечный пункт приема).

Общий алгоритм маршрутизации в сети МКА имеет достаточно сложную и разветвленную структуру. Он учитывает множество структурных и количественных параметров сети. На их основе формируется множество альтернативных участков маршрутов и зависимых вершин в них. В большинстве случае для текущей конфигурации сети возможно

построение набора различных маршрутов, что позволяет поддерживать некоторую избыточность аппаратов в сети.

Собственно говоря, маршрутизация состоит из 3-х рабочих алгоритмов:

- 1) алгоритм подготовки маршрутов на стартовом узле – StartRoute;
- 2) алгоритм формирования и анализа маршрутов на трансляционных (промежуточных) узлах – WorkRoute;
- 3) алгоритм сохранения построенных маршрутов – EndRoute.

Работа алгоритма StartRoute начинается с ввода (передачи) идентификатора начального и конечного узлов –

IDSource, *IDGoal*. Далее выполняется подготовка структур данных для формирования списка *ID* узлов в составе маршрутов количеством *K*. Для этого в динамической памяти выделяется место для структур данных – списков *Temp1* ... *TempK*. Размер списка *Temp* задается максимальное числом переходов – *TTL*. Каждый элемент списка *Temp* содержит 2 значения:

- 1) *ID* узла в составе маршрута;
- 2) накапливаемое значение метрики для текущего пути.

StartRoute на стартовом узле стартует с выполнения подпрограмм (*Count*) подсчета количества узлов, смежных с узлом *IDSource*, проведения широковещательной рассылки от узла *IDSource*. Из *No* возможных направлений получат сообщения *K* узлов, идентификаторы которых будут записаны в массив *ID[K]* – массив текущих узлов, смежных узлу-источнику. Для дальнейшей работы индексы узлов по столбцу с ненулевой метрикой из *Arr[i,No]* перезаписывается в список пройденных элементов сети *NSL[No]*.

В теле цикла осуществляется перебор элементов *NSL[No]*. Для непустых *NSL* [114] осуществляется запись текущего *ID* в список маршрутов *Temp*.

Алгоритм *StartRoute* завершается циклом проверки последних элементов списка временных маршрутов *Temp* на предмет достижения конечного узла (*IDGoal*) и предельной длины маршрута *TTL_{max}*. При выполнении этого условия формируется список конечных маршрутов количеством *t*. В завершение

выполняется переиндексация массива *ID[k]* и количества сформированных маршрутов *K* с учетом исключения неоптимальных по метрике маршрутов для алгоритма *WorkRoute*.

Работа алгоритма формирования и анализа маршрутов на трансляционных (промежуточных) узлах – *WorkRoute* – во многом схожа с работой алгоритма *StartRoute*.

Алгоритм *WorkRoute* (рис. 4) имеет несколько стартовых точек продолжения маршрута. Они хранятся во входном массиве *ID* [1 ... *K*]. Каждый элемент *ID[w]* является точкой продолжения маршрута, и в его отношении выполняется общий набор шагов и циклов по формированию и анализу маршрута.

Для текущего узла с *ID[w]* выполняется процедура *Count* подсчета количества элементов, смежных с элементом *ID[w]*, проводится широковещательная рассылка от текущего узла *ID[w]*. Из *No* возможных направлений получат сообщения только *K* узлов (*K* < *No*). Для дальнейшей работы индексы узлов по столбцу с ненулевой метрикой из *Arr[i,No]* перезаписывается в *NSL[No]*.

В теле цикла осуществляется перебор элементов *NSL[No]*. Для непустых *NSL* осуществляется запись текущего *ID* в список маршрутов *Temp*. В отличие от алгоритма *StartRoute* значение метрики после добавления нового элемента в конец маршрута накапливается. Это необходимо для последующего анализа и выбора маршрутов в узле *ID[w]* с наименьшей метрикой (один лучший, два лучших и т. д.).

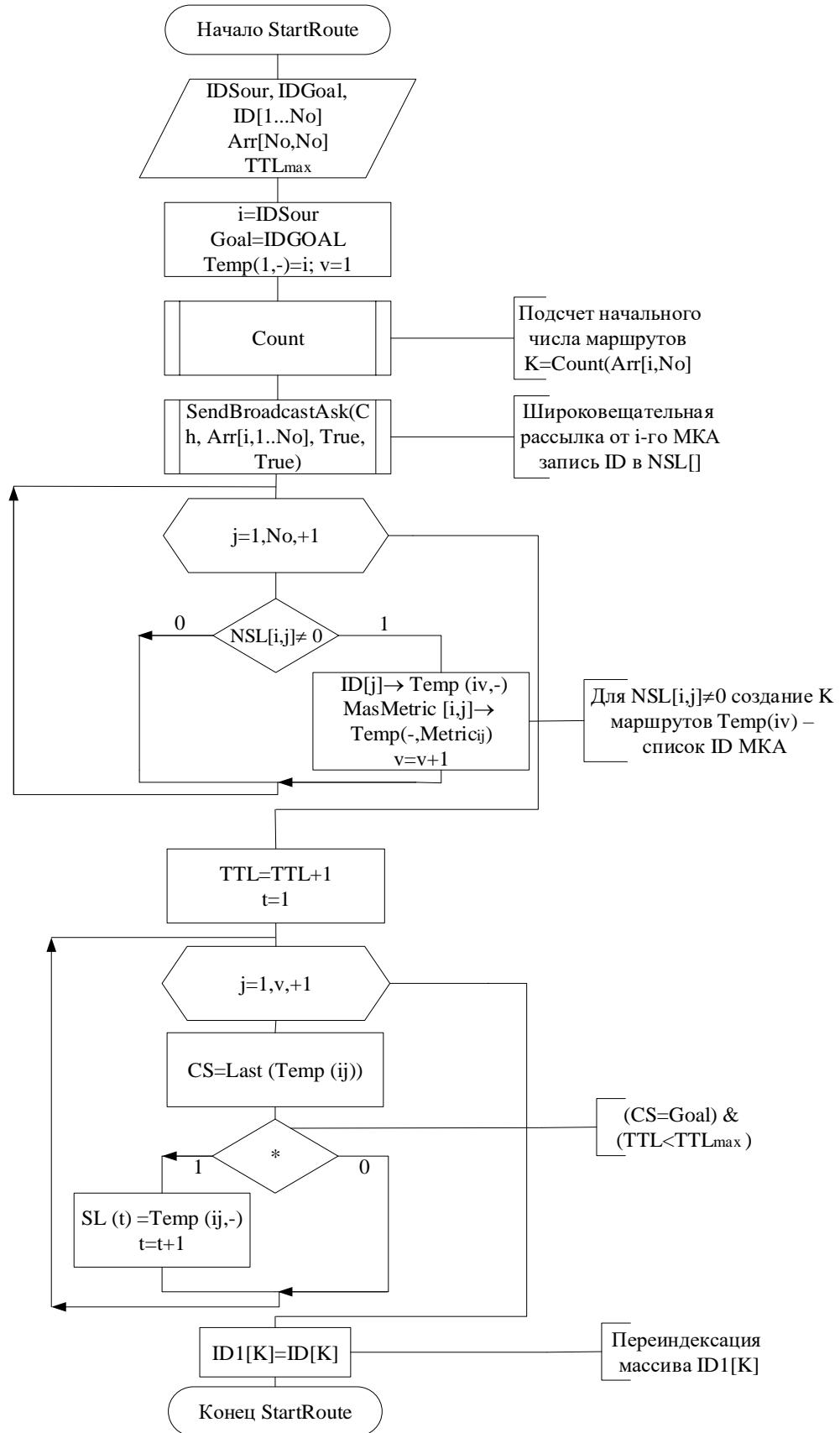


Рис. 4. Блок-схема алгоритма подготовки маршрутов

Fig. 4. Route preparation algorithm flowchart

Для текущего узла с $ID[w]$ выполняется процедура *Count* подсчета количества элементов, смежных с элементом $ID[w]$, проводится широковещательная рассылка от текущего узла $ID[w]$. Из No возможных направлений получат сообщения только K узлов ($K < No$). Для дальнейшей работы индексы узлов по столбцу с ненулевой метрикой из $Arr[i, No]$ перезаписывается в $NSL[No]$.

В теле цикла осуществляется перебор элементов $NSL[No]$. Для непустых NSL осуществляется запись текущего ID в список маршрутов *Temp*. В отличие от алгоритма *StartRoute* значение метрики после добавления нового элемента в конец маршрута накапливается. Это необходимо для последующего анализа и выбора маршрутов в узле $ID[w]$ с наименьшей метрикой (один лучший, два лучших и т. д.).

После проверки длины маршрута на предельное значение создается массив последних элементов для построенных маршрутов *MasCS()*, и на его основе выполняется процедура поиска и выбора маршрута с наименьшей метрикой – *MasCS()* при совпадающих последних элементах. Текущий узел $ID[w]$ самостоятельно принимает решение, оставляя из множества конкурирующих маршрутов только один. Сокращенное

число маршрутов перезаписывается в списки *Temp 1* ... *Temp K*.

Алгоритм *WorkRoute* (рис. 5) также завершается циклом проверки элементов списка временных маршрутов *Temp* на предмет достижения конечного узла (*IDGoal*) и предельной длины маршрута.

Работа алгоритма *EndRoute* запускается при условии достижения конечного узла *IDGoal* или при достижении предельного числа переходов *TTL*, далее которого маршрут не строится. Задача алгоритма *EndRoute* – переслать построенный маршрут из списка вершин *SL(t)*, формирующих маршрут.

Результаты и их обсуждение

Созданные метод и алгоритмы маршрутизации позволяют автономно реконфигурировать сеть при возникновении отказов одного из аппаратов.

Пусть для сети с наноспутниками количеством $M = 6$ сформирована сеть (рис. 6). Пусть в режиме циклического опроса МКА-4 является опрашивающим аппаратом. Для него в соответствии с процедурой образования сети получен список маршрутов. Каждый маршрут без повторов соединяет пары аппаратов, обеспечивая связность сети и возможность альтернативных путей.

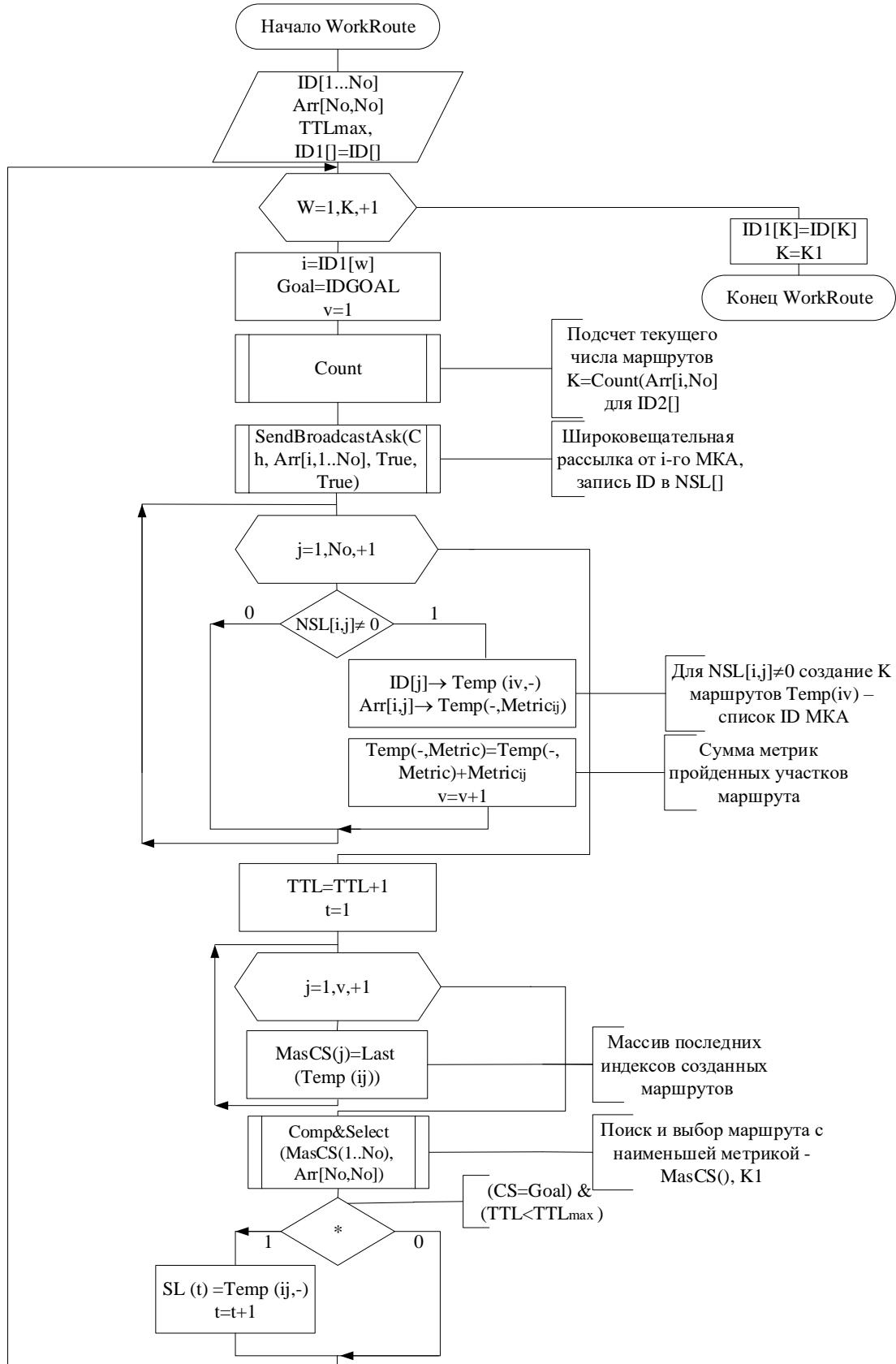


Рис. 5. Блок-схема алгоритма построения и анализа маршрутов

Fig. 5. Route construction and analysis algorithm flowchart

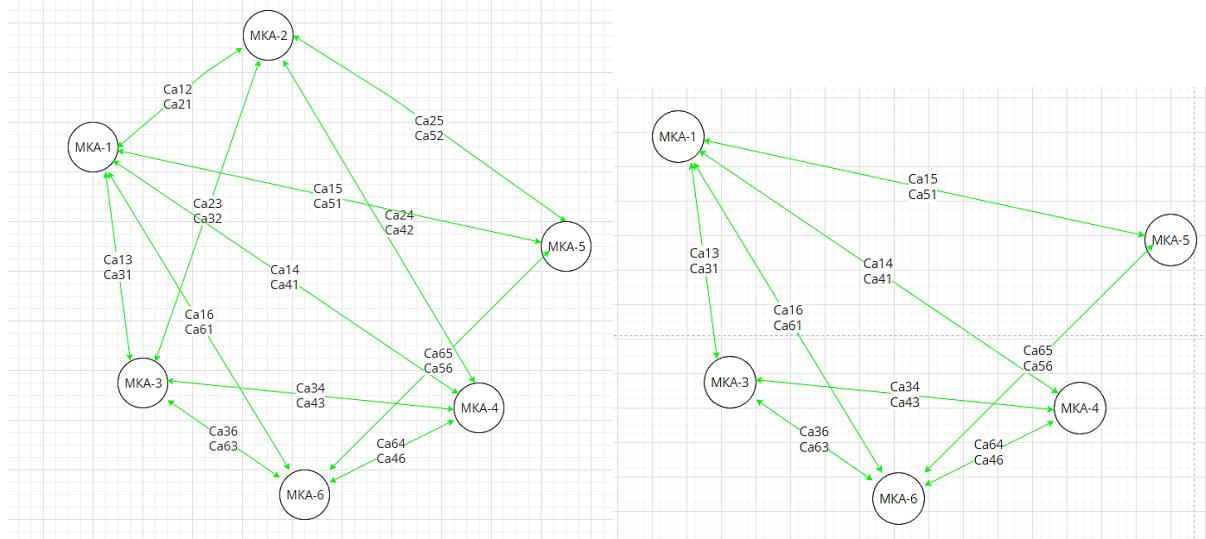


Рис. 6. Расширенная и сокращенная сети наноспутников

Fig. 6. Extended and reduced nanosatellite networks

Множество маршрутов для пары (МКА-4, МАКА-5) содержит:

МКА-4 -> МКА-2 -> МКА-5;

МКА-4 -> МКА-3 -> МКА-2 -> МКА-5;

МКА-4 -> МКА-3 -> МКА-1 -> МКА-5;

МКА-4 -> МКА-1 -> МКА-5;

МКА-4 -> МКА-1 -> МКА-2 -> МКА-5;

МКА-4 -> МКА-3 -> МКА-1 -> МКА-2 -> МКА-5;

МКА-4 -> МКА-2 -> МКА-1 -> МКА-5;

МКА-4 -> МКА-3 -> МКА-2 -> МКА-1 -> МКА-5;

МКА-4 -> МКА-2 -> МКА-3 -> МКА-1 -> МКА-5;

МКА-4 -> МКА-6 -> МКА-5;

МКА-4 -> МКА-6 -> МКА-1 -> МКА-5;

МКА-4 -> МКА-6 -> МКА-3 -> МКА-2 -> МКА-5;

МКА-4 -> МКА-6 -> МКА-5;

МКА-4 -> МКА-6 -> МКА-1 -> МКА-2 -> МКА-5.

Попутно по карте сети МКА-4 вычисляют оценки маршрутов, что выбрать минимальный маршрут и значения временных задержек отдельных частей маршрута (при необходимости):

$$0,011 + 0,022 = 0,033;$$

$$0,015 + 0,025 + 0,022 = 0,062;$$

$$0,015 + 0,015 + 0,02 = 0,032;$$

$$0,013 + 0,02 = 0,033;$$

$$0,013 + 0,01 + 0,022 = 0,045;$$

$$0,015 + 0,015 + 0,01 + 0,022 = 0,062;$$

$$0,011 + 0,011 + 0,02 = 0,042;$$

$$0,015 + 0,025 + 0,011 + 0,02 = 0,071;$$

$$0,011 + 0,025 + 0,015 + 0,02 = 0,071;$$

$$0,014 + 0,015 = 0,029;$$

$$0,014 + 0,025 + 0,02 = 0,059;$$

$$0,014 + 0,019 + 0,025 + 0,022 = 0,08;$$

$$0,014 + 0,015 = 0,029;$$

$$0,014 + 0,025 + 0,01 + 0,022 = 0,071.$$

Пусть МКА-2 перестал отвечать на запросы при актуализации сети. Тогда в отношении МКА-2 проводится децентрализованная реконфигурация сети и обновление списка маршрутов другими аппаратами. Маршруты, содержащие выбывший из карты сети аппарат – МКА-2, исключаются из списка маршрутов. Тем не менее наличие общих участков маршрутов по-прежнему обеспечивает связность сети и возможность передачи сообщений между МКА-4 и остальными аппаратами сети.

Децентрализованная реконфигурация основана на автономном пересчете экземпляров карты сети, что определяет линейные временные затраты. При одновременном отказе нескольких аппаратов в сети процедура согласования экземпляров карты сети исключает полный перебор строк в матрице, так как учитывается резервирование участков маршрутов сети. По аналогии с вычислительными системами частичная дешифрация адреса обеспечивает быстрый доступ к блоку памяти и последующий переход к обработке [22].

Централизованный метод управления сетью имеет квадратичные затраты, поскольку осуществляется последовательный перебор всех аппаратов в сети и для каждого аппарата, – все строки карты сети равноправны. Как следствие, метод централизованной реконфигурации имеет избыточную временную сложность и дополнительные затраты на полный перебор всех строк матрицы.

Анализ методов управления группировкой МКА показал, что наиболее

эффективным является метод децентрализованного управления, позволяющий автономно принимать решения на основе распределенной информационной структуры – карты сети, что обеспечивает возможность прогнозирования будущих состояний на основе анализа и обработки текущих и ретроспективных данных [23].

Выводы

Разработанный метод реконфигурации имеет двухуровневую организацию, что позволяет повысить живучесть сети взаимодействующих МКА за счет упреждающего перераспределения связей между аппаратами в процессе служебных сеансов реконфигурации, а также поддерживать необходимое количество аппаратов в сети.

В качестве базовых операций в сети МКА определены операции: инициализация сети МКА, пополнение и актуализация сети МКА на основе приемо-передающих процессов между парами аппаратов. Реализация динамически поддерживаемых соединений и прогнозных оценок позволяет вести реконфигурацию сети спутников при динамическом изменении ее состава.

Децентрализованное управление сетью с использованием распределённой карты сети имеет линейные оценки временных затрат на реконфигурацию или актуализацию сети, тогда как централизованный подход, использующий неделимый информационный ресурс для учета всех перебираемых пар аппаратов, имеет квадратичную оценку.

Список литературы

1. Горячева Е. П., Куйшибаев Т. З., Прошин А. А. Наноспутники Cubesat // NovaInfo.Ru. 2015. Т. 1, № 36. С. 51–55.
2. Глазкова И. А. Анализ опыта создания космических систем дистанционного зондирования Земли на базе малых космических аппаратов и тенденции развития российской космической промышленности в этой области // Космонавтика и ракетостроение. 2010. № 2(59). С. 70–77.
3. Сергеева А. Е. Развитие перспективных космических технологий и систем как основа технологического суверенитета России // Мир новой экономики. 2025. Т. 19, № 1. С. 17–26. <https://doi.org/10.26794/2220-6469-2025-19-1-17-26>
4. Балухто А. Н., Матвеев С. А., Хартов В. В. Основные принципы построения и организации функционирования интеллектуальных многоспутниковых систем на базе малых космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2018. № 6(105). С. 127–140.
5. Клименко А. Б. Методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25, № 3. С. 136–151. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-136-151>
6. Автономная интеллектуальная группировка малых космических аппаратов – космический эксперимент «Радиоскаф-5» / О. И. Атакищев, Е. А. Шиленков, С. Н. Фролов [и др.] // Известия Института инженерной физики. 2020. № 1 (55). С. 42–48.
7. Устюгов Е. В., Шафран С. В., Соболев А. А. Новая архитектура наноспутника стандарта CubeSat без использования бортовой кабельной сети // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 5. С. 423–429. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2018-61-5-423-429>
8. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / под ред. В. Х. Пшихопова. М.: Физматлит, 2015. 305 с.
9. Кенина Д. С., Звягинцева О. С., Хрипкова Л. Н. Принятие управлений решений в условиях риска и неопределенности // Kant. 2020. № 4 (37). С. 106–109. <https://doi.org/10.24923/2222-243X.2020-37.23>
10. Подход к построению интеллектуальной распределенной системы поддержки принятия решений при управлении группой самоуправляемых роботизированных средств в условиях воздействия дестабилизирующих факторов / Н. А. Михеев, С. А. Поляков, Е. А. Ряхова, В. А. Тимофеев // Динамика сложных систем – XXI век. 2023. Т. 17, № 1. С. 30–37.

11. Рачков Т. И., Кузьмина И. А. Мета-эвристический алгоритм децентрализованного управления группой // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 3. С. 96–99.
12. Свиридов В. В. Формализованный подход к синтезу архитектуры системы адаптивного группового управления робототехническими комплексами в условиях недетерминированной динамической среды // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 2 (226). С. 78–88. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-2-78-88>
13. Лаврова Д. С., Соловей Р. С. Обеспечение информационной безопасности беспроводных динамических сетей на основе теоретико-игрового подхода // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2020. № 2. С. 16–22.
14. Птицына Л. К., Лебедева А. А. Модельно-аналитическое обеспечение информационных интеллектуальных агентов с динамической синхронизацией их действий // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2014. Т. 6, № 6. С. 68–71.
15. Стецюра Г. Г. Децентрализованная автономная синхронизация процессов взаимодействия мобильных объектов // Проблемы управления. 2020. № 6. С. 46–56.
16. Татарникова Т. М., Миклуш В. А. Имитационная модель одноранговой беспроводной сенсорной сети // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 3. С. 20–26. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2023-17-3-20-26>
17. Клименко А. Б. Методика выбора способа управления распределенными информационными системами в условиях высокой динамики сетевой инфраструктуры // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25, № 3. С. 136–151. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-136-151>
18. Аганесов А. В. Анализ качества обслуживания в воздушно-космической сети связи на основе иерархического и децентрализованного принципов ретрансляции информационных потоков // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 3. С. 92–121.
19. Гаркуша, С. В., Гаркуша Е. В. Комплексное решение задач распределения частотных каналов и потоковой маршрутизации в MESH-сетях стандарта IEEE 802.11, представленных в виде гиперграфа // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. 2015. № 1. С. 96–100.
20. Аппаратно-программные средства динамической реконфигурации группировки малых космических аппаратов / С. Г. Емельянов, С. Н. Фролов, Е. А. Титенко [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. 2024. № 3 (239). С. 18–32. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2024-3-18-32>
21. Разработка формата карты сети малых космических аппаратов и алгоритмов функционирования сетевого программного обеспечения / О. И. Атакищев, Е. А. Шиленков, С. Н. Фролов [и др.] // Известия Института инженерной физики. 2024. № 4 (74). С. 61–73.

22. Выбор архитектуры нейронной сети для реализации когнитивных функций сетевого программного обеспечения управления группировкой взаимодействующих малых космических аппаратов / Е. А. Шиленков, С. Н. Фролов, Е. А. Титенко, С. Ю. Мирошниченко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 8–26. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-8-26>

23. Ходукин Р. А., Томакова Р. А., Малышев А. В. Методы анализа телематических данных для систем поддержки принятия решений оптимального беспилотного управления автомобилями // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 2. С. 108–118. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-108-118>

References

1. Goryacheva E.P., Kuishibaev T.Z., Proshin A.A. Cubesat nanosatellites. *NovaInfo.Ru*. 2015;1(36):51–5. (In Russ.)
2. Glazkova I.A. Analysis of the experience of creating space systems for remote sensing of the Earth based on small spacecraft and trends in the development of the Russian space industry in this area. *Kosmonavtika i raketostroenie = Cosmonautics and Rocket Engineering*. 2010;(2):70–77. (In Russ.)
3. Sergeeva A.E. D Development of promising space technologies and systems as the basis of Russia's technological sovereignty. *Mir novoi ekonomiki = The World of the New Economy*. 2025;19(1):17–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.26794/2220-6469-2025-19-1-17-26>
4. Balukhto A.N., Matveyev S.A., Khartov V.V. Basic principles of construction and organization of functioning of intelligent multi-satellite systems based on small spacecraft. *Kosmonavtika i raketostroenie = Cosmonautics and Rocket Engineering*. 2018;(6):127–140. (In Russ.)
5. Klimenko A.B. Methodology for selecting a method for managing distributed information systems in conditions of highly dynamic network infrastructure. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021;25(3):136–151. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-136-151>
6. Atakishchev O.I., Shilenkov E.A., Frolov S.N., et al. Autonomous intelligent constellation of small spacecraft – the Radioskaf-5 space experiment. *Izvestiya Instituta inzhenernoi fiziki = Proceedings of the Institute of Engineering Physics*. 2020;(1):42–48. (In Russ.)
7. Ustyugov E.V., Shafran S.V., Sobolev A.A. New architecture of a CubeSat nanosatellite without using an on-board cable network. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Instrument Making*. 2018;61(5):423–429. (In Russ.) <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2018-61-5-423-429>
8. Pshikhopov V.Kh. (ed.) Group control of moving objects in uncertain environments. Moscow: Fizmatlit; 2015. 305 p. (In Russ.)
9. Kenina D.S., Zvyagintseva O.S., Khripkova L.N. Making management decisions under conditions of risk and uncertainty. *Kant*. 2020;(4):106–109. (In Russ.) <https://doi.org/10.24923/2222-243X.2020-37.23>

10. Mikheev N.A., Polyakov S.A., Ryakhova E.A., Timofeev V.A. An Approach to Building an Intelligent Distributed Decision Support System for Managing a Group of Self-Driving Robotic Vehicles Under the Influence of Destabilizing Factors. *Dinamika slozhnykh sistem – XXI vek = Dynamics of Complex Systems – XXI Century*. 2023;17(1):30–37. (In Russ.)
11. Rachkov T.I., Kuzmina I.A. Meta-heuristic algorithm for decentralized group control. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike = Mathematical Methods in Technology and Engineering*. 2021;(3):96–99. (In Russ.)
12. Sviridov V.V. Formalized approach to the synthesis of the architecture of an adaptive group control system for robotic complexes in a non-deterministic dynamic environment. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of SFedU. Technical Sciences*. 2022;2(226):78–88. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-2-78-88>
13. Lavrova D.S., Solovey R.S. Ensuring information security of wireless dynamic networks based on a game-theoretical approach. *Problemy informatsionnoi bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy = Problems of Information Security. Computer Systems*. 2020;(2):16–22. (In Russ.)
14. Ptitsyna L.K., Lebedeva A.A. Modeling and analytical support for intelligent information agents with dynamic synchronization of their actions. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli = Science-Intensive Technologies in Space Research of the Earth*. 2014;6(6):68–71. (In Russ.)
15. Stetsyura G.G. Decentralized autonomous synchronization of interaction processes of mobile objects. *Problemy upravleniya = Problems of Control*. 2020;(6):46–56. (In Russ.)
16. Tatarnikova T.M., Miklush V.A. Simulation model of a peer-to-peer wireless sensor network. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport = T-Comm: Telecommunications and Transport*. 2023;17(3):20–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2023-17-3-20-26>
17. Klimenko A.B. Methodology for choosing a method for managing distributed information systems in conditions of highly dynamic network infrastructure. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021;25(3):136–151. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-136-151>
18. Aganesov A.V. Analysis of the quality of service in the aerospace communication network based on the hierarchical and decentralized principles of relaying information flows. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Control, Communication and Security Systems*. 2015;(3):92–121. (In Russ.)
19. Garkusha S.V., Garkusha E.V. Complex solution of problems of frequency channel distribution and stream routing in IEEE 802.11 standard MESH networks presented in the form of a hypergraph. *Trudy Severo-Kavkazskogo filiala Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki = Proceedings of the North Caucasus branch of the Moscow Technical University of Communications and Informatics*. 2015;(1):96–100. (In Russ.)
20. Emelianov S.G., Frolov S.N., Titenko E.A., et al. Hardware and software tools for dynamic reconfiguration of a group of small spacecraft. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie*

nauki = Proceedings of the Southern Federal University. Technical sciences. 2024;(3):18–32.
(In Russ.) <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2024-3-18-32>

21. Atakishchev O.I., Shilenkov E.A., Frolov S.N., et al. Development of a small space-craft network map format and network software functioning algorithms. *Izvestiya Instituta inzhenernoi fiziki = Proceedings of the Institute of Engineering Physics.* 2024;(4):61–73.

22. Shilenkov E.A., Frolov S.N., Titenko E.A., Miroshnichenko S.Yu. Selection of neural network architecture for the implementation of cognitive functions of network software for controlling a group of interacting small spacecraft. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroeni = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2023;13(4):8–26.
(In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-8-26>

23. Khodukin R.A., Tomakova R.A., Malyshev A.V. Methods of telematics data analysis for decision support systems for optimal unmanned vehicle control. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroeni = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;5(2):108–118. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-108-118>

Информация об авторах / Information about the Authors

Титенко Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем имени Константина Эдуардовича Циолковского, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: johntit@mail.ru, Researcher ID: P-3380-2015, ORCID: 0000-0002-5659-4747

Шиленков Егор Андреевич, кандидат технических наук, директор, Научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем имени Константина Эдуардовича Циолковского, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ub3wc@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6464-2462

Evgeny A. Titenko, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher of the Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky Research Institute of Space Instrumentation and Radio-Electronic Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: johntit@mail.ru, Researcher ID: P-3380-2015, ORCID: 0000-0002-5659-4747

Egor A. Shilenkov, Candidate of Sciences (Engineering), Director of the Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky Research Institute of Space Instrumentation and Radio-Electronic Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ub3wc@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6464-2462

Фролов Сергей Николаевич, кандидат технических наук, заместитель директора Научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем имени Константина Эдуардовича Циолковского, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: snfrolov@bk.ru, ORCID: 0000-0001-5855-4717

Соглаев Владислав Павлович, инженер Научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем имени Константина Эдуардовича Циолковского, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: svp1998@mail.ru, ORCID: 0009-0008-7775-1562

Тетерин Дмитрий Павлович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем имени Константина Эдуардовича Циолковского, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tetelv@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9596-2939

Атакищев Олег Игоревич, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по специальным проектам, Институт инженерной физики, Московская область, г. Серпухов, Российская Федерация, e-mail: aoi007@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2280-673

Sergey N. Frolov, Candidate of Sciences (Engineering), Deputy Director of Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky Research Institute of Space Instrumentation and Radio-Electronic Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: snfrolov@bk.ru, ORCID: 0000-0001-5855-4717

Vladislav P. Soglaev, Engineer of the Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky Research of the Institute of Space Instrumentation and Radio-Electronic Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: svp1998@mail.ru, ORCID: 0009-0008-7775-1562

Dmitry P. Telegin, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Chief Researcher of the Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky Research Institute of Space Instrumentation and Radio-Electronic Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: tetelv@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9596-2939

Oleg I. Atakishchev, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Deputy Director General for Special Projects, Institute of Engineering Physics, Moscow region, Serpukhov, Russian Federation, e-mail: aoi007@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2280-673

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-89-106>

УДК 617.58

Математическое моделирование движения стопы при ходьбе по подвижному горизонтальному основанию

С. Ф. Яцун¹ , Г. А. Фурсов¹, А. А. Сидорова¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

 e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Цель исследования – разработка математической модели, описывающей биомеханические и антропометрические параметры человека в процессе ходьбы в различных режимах (медленная и быстрая походка). Создаваемая модель предназначена для интеграции в систему управления реабилитационными экзоскелетами с целью динамической коррекции двигательного паттерна на основе обработки кинематических данных в реальном времени. Дополнительной задачей является определение характеристик модели, используемой для адаптации к индивидуальным особенностям пользователя.

Методы. Рассматриваются экспериментальные исследования по видеосъемке захвата движения ключевых точек ноги испытуемого на беговой дорожке с последующей обработкой данных в программном обеспечении *OpenSourcePhysicsTracker*. Сравнительный анализ точности аппроксимации траекторий проводился с применением полиномиальной регрессии и гармонического анализа (ряды Фурье) в пакете *Curve Fitting Toolbox* (*MATLAB R2023a*). Валидация моделей выполнена путем расчета среднеквадратической ошибки (*MSE*) (при этом *MSE* не превышала $1,51 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$) и эмпирических методов.

Результаты. Установлено, что тригонометрический метод (ряды Фурье) обеспечивает значительно более высокую точность аппроксимации периодических траекторий походки по сравнению с полиномиальным методом, что подтверждается меньшими значениями среднеквадратической ошибки. Полиномиальная модель демонстрировала неустойчивое поведение при порядках выше 7-го, проявляя склонность к сильным отклонениям в концевых участках интервала. Для гармонической модели оптимальное число компонент составило 5–7 гармоник. Получены гладкие аппроксимированные траектории для всех ключевых точек стопы и угла поворота плюснефалангового сустава, представлены коэффициенты разложения в ряд Фурье для координат по осям *X* и *Z*.

Заключение. Разработана эффективная методика математического моделирования траекторий движения стопы при ходьбе на основе рядов Фурье. Данный метод признан наиболее предпочтительным для описания биомеханических паттернов ходьбы. Полученные модели обладают высоким прикладным потенциалом для создания систем управления реабилитационной техникой, обеспечивая персонализацию с учетом антропометрических характеристик пациентов.

Ключевые слова: математическое моделирование; биомеханика ходьбы; анализ походки; ряды Фурье; полиномиальная аппроксимация; реабилитационные устройства.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Государственного Минобрнауки России по теме «Разработка методов синтеза адаптивных и интеллектуальных робототехнических устройств и комплексов в целях расширения функциональных технологических и производственных возможностей человека» (соглашение № 075-03-2025-526).

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Яцун С. Ф., Фурсов Г. А., Сидорова А. А., 2025

Для цитирования: Яцун С. Ф., Фурсов Г. А., Сидорова А. А. Математическое моделирование движения стопы при ходьбе по подвижному горизонтальному основанию // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 4. С. 89–106. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-89-106>

Поступила в редакцию 15.10.2025

Подписана в печать 12.11.2025

Опубликована 26.12.2025

Mathematical modeling of gait on a movable horizontal base

Sergey F. Yatsun¹ , Gavriil A. Fursov¹, Alina A. Sidorova¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

 e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

The purpose of the research is development of a mathematical model describing human biomechanical and anthropometric parameters during walking under different conditions (slow and fast gait). The developed model is intended for integration into the control system of rehabilitation exoskeletons to enable dynamic correction of movement patterns through real-time processing of kinematic data. An additional objective is the parameterization of the model for adaptation to individual user characteristics.

Methods. Experimental studies involved video recording of key lower limb point movements of subjects on a treadmill, with subsequent data processing in OpenSourcePhysics Tracker software. A comparative analysis of trajectory approximation accuracy was conducted using polynomial regression and harmonic analysis (Fourier series) in the Curve Fitting Toolbox (MATLAB R2023a). Model validation was performed by calculating the mean square error (MSE), where the MSE did not exceed $1,51 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, along with empirical methods.

Results. It was established that the trigonometric method (Fourier series) provides significantly higher accuracy in approximating periodic gait trajectories compared to the polynomial method, as confirmed by lower mean square error values. The polynomial model demonstrated unstable behavior at orders above 7, showing a tendency for significant deviations at the interval endpoints. For the harmonic model, the optimal number of components was 5–7 harmonics. Smooth approximated trajectories were obtained for all key points of the foot and the rotation angle of the metatarsophalangeal joint, with Fourier series expansion coefficients presented for coordinates along the X and Z axes.

Conclusion. An effective methodology for mathematical modeling of foot movement trajectories during walking based on Fourier series has been developed. This method is recognized as the most preferable for describing biomechanical walking patterns. The obtained models possess high application potential for creating control systems for rehabilitation equipment, enabling personalization based on patients' anthropometric characteristics.

Keywords: mathematical modeling; biomechanics of walking; gait analysis; Fourier ranks; polynomial approximation; rehabilitation devices.

Funding: The work was supported by the State Assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation on the topic "Development of methods for the synthesis of adaptive and intelligent robotic devices and complexes in order to expand the functional technological and production capabilities of humans" (Agreement N 075-03-2025-526).

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Yatsun S.F., Fursov G.A., Sidorova A.A. Mathematical modeling of gait on a movable horizontal base. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(4):89–106. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-89-106>

Received 15.10.2025

Accepted 12.11.2025

Published 26.12.2025

Введение

Современная робототехника все чаще обращается к созданию высокоточных устройств [1], таких как активные протезы, экзоскелеты и роботизированные тренажерные комплексы [2], на базе которых создается реабилитационная техника нового поколения [3].

Особой проблемой является создание реабилитационных устройств нижних конечностей [4]. Одним из требований, предъявляемым к таким системам, является необходимость естественной, антропоморфной походки [5], которая способствует повышению эффективности процесса восстановления опорно-двигательного аппарата [6].

Достижение этой цели невозможно без глубокого изучения биомеханики человеческой ходьбы [7] и разработки точных математических моделей [8], описывающих движение нижних конечностей и особенно стопы [9].

Антропоморфная походка подразумевает естественные движения, имитирующие человеческую ходьбу, с учетом индивидуальных особенностей строения тела и физиологических возможностей. Различают медленную и быструю походки. Медленная походка характеризуется такой скоростью движения, при которой проекция центра масс человека все время находится в опорном полигоне, определяемым стопой. Быстрая походка отличается тем, что в опорном полигоне находится проекция центра

давления, получившая название точки нулевого момента (ZMP) [10].

Несмотря на большое число публикаций, касающихся исследования ходьбы, вопросы моделирования движения медленной и быстрой походки изучены недостаточно.

Настоящее исследование направлено на разработку математической модели, предназначеннной для анализа и изучения биомеханических антропометрических параметров человека в процессе ходьбы в различных режимах.

Для выполнения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Проведение эксперимента по видеозахвату движения стопы испытуемого на беговой дорожке с последующей обработкой полученных данных в специализированном программном обеспечении.

2. Проведение сравнительного анализа методов аппроксимации с целью выбора оптимальной математической модели, обеспечивающей наибольшую точность и адекватность описания периодических траекторий биомеханических систем.

Результаты работы имеют высокую практическую значимость, так как полученные математические модели могут быть напрямую интегрированы в систему управления приводами реабилитационных устройств.

Материалы и методы

Эксперимент по видеозахвату траектории перемещения ключевых точек

ноги во время движения на беговой дорожке направлен на изучение биомеханических особенностей ходьбы.

Рассматривается движение в сагиттальной плоскости. Схема проводимого эксперимента представлена ниже (рис. 1).

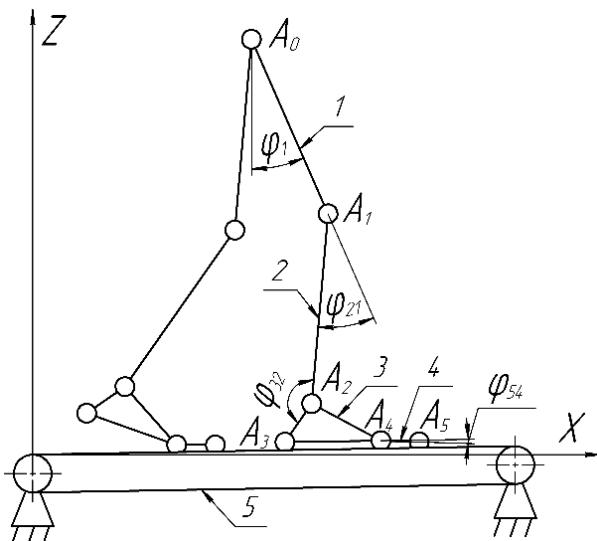


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для исследования походки:

A_0 – бедренный сустав; A_1 – коленный сустав; A_2 – голеностопный сустав; A_3 – пятка; A_4 – плюсневофаланговый сустав; A_5 – дистальная фаланга пальца; φ_1 – угол поворота бедренного сустава; φ_{21} – угол поворота коленного сустава относительно бедренного сустава; φ_{32} – угол поворота стопы относительно коленного сустава; φ_5 – абсолютный угол поворота дистальной фаланги пальца; φ_{54} – угол поворота дистальной фаланги пальца относительно плюсневофалангового сустава; 1 – бедро; 2 – голень; 3 – плюсна; 4 – фаланги пальцев; 5 – беговая дорожка

Fig. 1. Scheme of the experiment: A_0 – hip joint; A_1 – knee joint; A_2 – ankle joint; A_3 – heel bone; A_4 – metatarsophalangeal joint; A_5 – distal phalanx of the toe; φ_1 – hip joint rotation angle; φ_{21} – knee joint rotation angle relative to the hip joint; φ_{32} – foot rotation angle relative to the knee joint; φ_5 – absolute rotation angle of the distal phalanx; φ_{54} – rotation angle of the distal phalanx relative to the metatarsophalangeal joint; 1 – thigh; 2 – shin; 3 – metatarsus; 4 – phalanges of the toes; 5 – treadmill

Рассмотрим процесс видеозахвата (рис. 2). Захват траекторий выполнялся в соответствии с ниже представленным алгоритмом. Для обработки видеоматериала использовалось программное обеспечение OpenSourcePhysicsTracker [11]. Основные характеристики пациента [12]:

- длина бедра – 0,42 м;
- длина голени – 0,44 м;
- длина свода стопы – 0,18 м;
- длина фаланг пальца – 0,08 м.

Основные характеристики беговой дорожки:

- скорость – 0–3,6 км/ч;
- угол наклона ленты – 0–3°;
- длина полотна – 1 м.

После импортирования видеоролика в среду Tracker необходимо задать начало координат, соответствующее бедренному маячку. Далее указывается калибровочный размер с помощью измерительной ленты длиной 0,80 м (рис. 2, цифра 1). Далее, можно приступать к

автоматическому захвату положения ключевых точек и записи их траекторий. Для этого создадим и укажем ключевые точки. После выполнения данного действия, можно запустить процедуру отслеживания положения точек.

После выполнения вышеописанных действий, мы получаем несколько наборов массивов с координатами (где t – время, с; x и z – пространственные координаты, м). Полученные данные использованы для анализа в программной среде MATLAB.



Рис. 2. Процесс видеозахвата траектории:
 $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$ – ключевые точки;
1 – измерительная лента;
2 – беговая дорожка

Fig. 2. The motion capture process:
 $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$ – tracking markers;
1 – measuring tape; 2 – treadmill

Для аппроксимации траектории перемещения точек существует множество различных методов [13], которые характеризуются своими особенностями [14]. В данной статье для оцифровки экспериментальных данных рассматриваются

полиномиальный метод и тригонометрический метод (ряды Фурье).

Полиномиальная аппроксимация [15] – один из самых простых методов для описания траектории точек, особенно когда описываемая траектория достаточно гладкая и может быть описана полиномом заданной степени [16]. Суть полиномиальной аппроксимации заключается в том, что на основе метода наименьших квадратов (МНК) подбираются коэффициенты полинома, которые наиболее точно описывают заданную траекторию. Общая формула полинома представлена ниже:

$$f(t) = \sum_i^n a_i t^i, \quad (1)$$

где a – коэффициенты полинома; t – время; n – степень полинома, порядок аппроксимации.

Полиномиальные функции легко подвергаются дифференцированию, из-за чего упрощается анализ физических характеристик, однако полином не учитывает динамические ограничения, из-за чего он может выдавать нереалистичные результаты.

Ряд Фурье – математический инструмент, созданный для анализа периодических движений [17]. Суть метода заключается в том, что любую траекторию можно представить как сумму косинусов и синусов с разными частотами. Общая формула разложения по ряду Фурье представлена ниже:

$$f(t) = a_0 + \sum_{q=1}^N (a_q \cos(q\omega t) + b_q \sin(q\omega t)), \quad (2)$$

где a_0 – постоянная составляющая (среднее значение функции за период); a_q, b_q – коэффициенты ряда Фурье, которые рассчитываются для каждой гармоники; N – порядок ряда; q – номер гармоники; ω – основная круговая частота.

Применение ряда Фурье позволяет представить сложный сигнал как суперпозицию простых гармонических колебаний, каждое из которых соответствует конкретной частоте, амплитуде и фазе. При увеличении числа компонентов ряда Фурье растёт точность аппроксимируемой траектории. Вместе с этим, уменьшая их количество, траектория становится более гладкой, избавляясь от

лишних шумов, что добавляет данному методу возможность фильтровать полученную траекторию.

Результаты и их обсуждение

В ходе эксперимента были получены массивы координат ключевых точек стопы в процессе движения по беговой дорожке. Эти данные представляют собой дискретные значения положений точек во времени, зафиксированные системой видеозахвата. Изменения положения каждой точки относительно оси X и оси Z представлены на рисунках 3 и 4 соответственно.

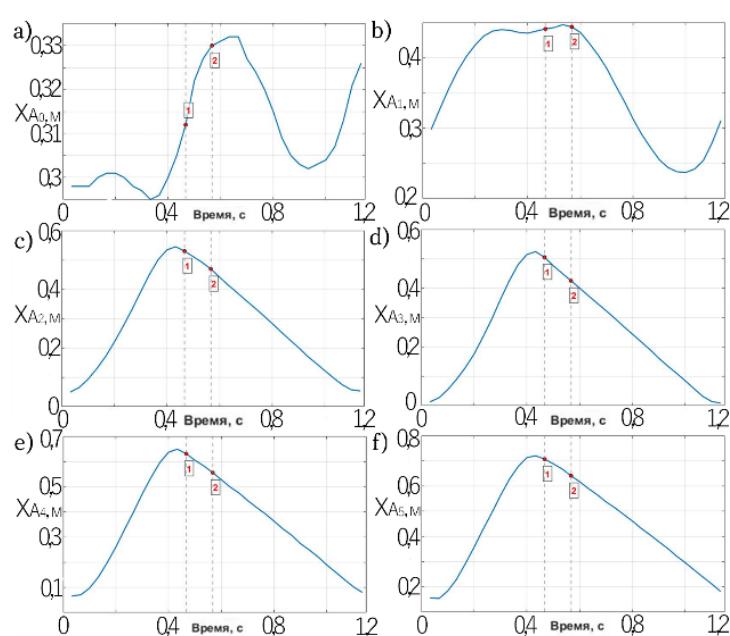


Рис. 3. Экспериментальная траектория движения по оси X: a – бедренного сустава; b – коленного сустава; c – голеностопного сустава; d – пятой кости; e – плюснефалангового сустава; f – дистальной фаланги пальца; 1 – начальный контакт; 2 – полный контакт с поверхностью (пронация)

Fig. 3. Experimental trajectory of motion along the X-axis: a – hip joint; b – knee joint; c – ankle joint; d – heel bone; e – metatarsophalangeal joint; f – distal phalanx of the toe; 1 – initial contact; 2 – full contact with the surface (pronation)

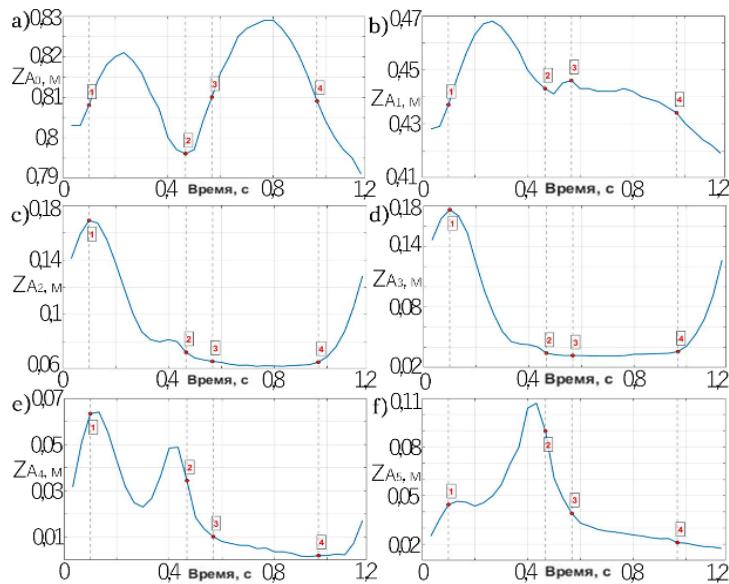


Рис. 4. Экспериментальная траектория движения по оси Z : *a* – бедренного сустава; *b* – коленного сустава; *c* – голеностопного сустава; *d* – пятончай кости; *e* – плюснефалангового сустава; *f* – дистальной фаланги пальца; 1 – полный отрыв стопы от поверхности; начало маховой фазы; 2 – начальный контакт; 3 – полный контакт с поверхностью (пронация); 4 – пятка отрывается от поверхности; вес переносится на передний отдел стопы

Fig. 4. Experimental trajectory of motion along the Z -axis: *a* – hip joint; *b* – knee joint; *c* – ankle joint; *d* – heel bone; *e* – metatarsophalangeal joint; *f* – distal phalanx of the toe; 1 – full foot lift-off (beginning of the swing phase); 2 – initial contact; 3 – full foot contact with the surface (pronation); 4 – heel lift-off (weight transfer to the forefoot)

Рассмотрим общий вид траектории ключевых точек стопы (рис. 5).

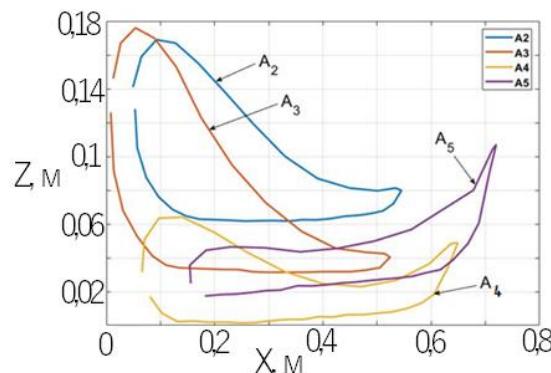


Рис. 5. Экспериментальная траектория перемещения ключевых точек стопы

Fig. 5. Experimental trajectory of the main points of the foot

Определим закон изменения относительного угла поворота стопы относительно голени (угол φ_{54} на рис. 6).

Угол φ_{54} :

$$\operatorname{tg} \varphi_5 = \frac{z_{A_5} - z_{A_4}}{x_{A_5} - x_{A_4}}, \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_4 = \frac{z_{A_4} - z_{A_3}}{x_{A_4} - x_{A_3}}, \quad (4)$$

$$\varphi_{54} = \varphi_5 - \varphi_4. \quad (5)$$

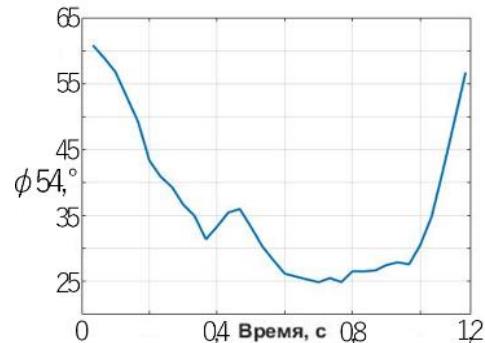


Рис. 6. Экспериментальное изменение угла φ_{54}

Fig. 6. Experimental change in angle φ_{54}

Для определения наиболее подходящего метода для построения траекторий в программной среде MATLAB с помощью пакета CurveFittingTool [18] был проведён сравнительный анализ полиномиального и тригонометрического методов. Сравнение производилось с помощью расчёта среднеквадратической ошибки E , формула которой представлена ниже, и визуального анализа построенных траекторий:

$$E = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_i - f(t_i))^2, \quad (6)$$

где M – количество наблюдений; y_i – фактическое значение для i -го наблюдения для осей Z и X ; $f(t_i)$ – прогнозируемое значение для i -го наблюдения.

Графики построенных траекторий, полученные с помощью тригонометрического и полиномиального методов, представлены ниже (рис. 7 и 8).

При повышении порядка наблюдается большее совпадение аппроксимированной траектории с первоначальной, что выражается в уменьшении среднеквадратической ошибки представленной ниже (табл. 1). Но при повышении порядка полинома, начиная с 8-го порядка, траектория считается некорректно (рис. 9). Подобное происходит по причине того, что рассчитанные коэффициенты имеют слишком большое значение. При ограничении коэффициентов полином даёт более приближенные значения.

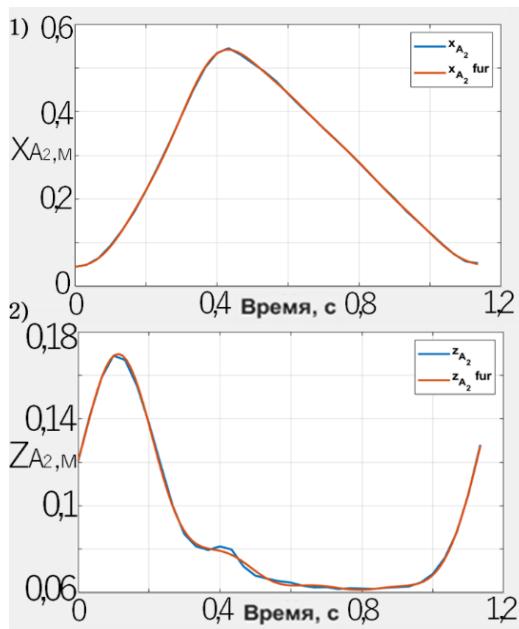


Рис. 7. Траектория движения голеностопного сустава, полученная с помощью ряда Фурье 6-го порядка: 1 – изменение положения по оси X ; 2 – изменение положения по оси Z ; x_{A_2} , z_{A_2} – реальная траектория; x_{A_2} fur, z_{A_2} fur – аппроксимированная траектория

Fig. 7. Trajectory of the ankle joint motion obtained using a 6th order Fourier series: 1 – position change along the X -axis; 2 – position change along the Z -axis; x_{A_2} , z_{A_2} – actual trajectory; x_{A_2} fur, z_{A_2} fur – approximated trajectory

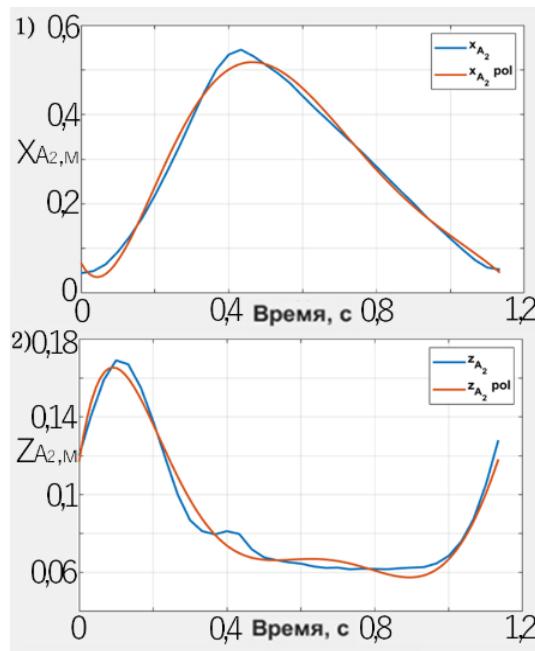


Рис. 8. Траектория движения голеностопного сустава, полученная с помощью полинома 6-го порядка: 1 – изменение положения по оси X ; 2 – изменение положения по оси Z ; x_{A_2} , z_{A_2} – реальная траектория; $x_{A_2} pol$, $z_{A_2} pol$ – аппроксимированная траектория

Fig. 8. Trajectory of the ankle joint motion obtained using a 6th-order polynomial:
1 – position change along the X -axis; 2 – position change along the Z -axis;
 x_{A_2} , z_{A_2} – actual trajectory; $x_{A_2} pol$, $z_{A_2} pol$ – approximated trajectory

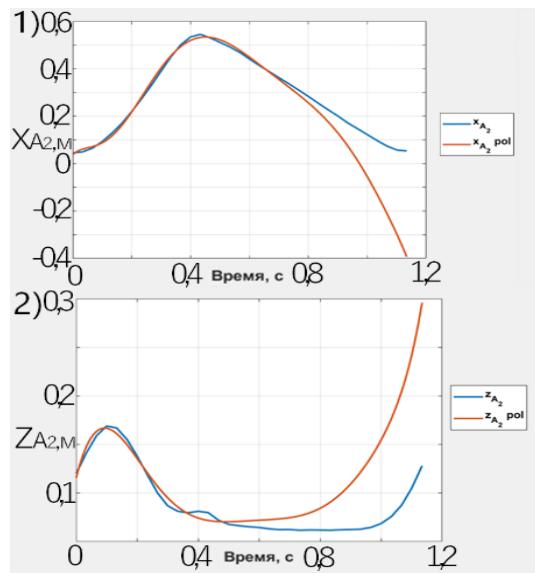


Рис. 9. Траектория движения голеностопного сустава, полученная с помощью полинома 8-го порядка: 1 – изменение положения по оси X ; 2 – изменение положения по оси Z ; x_{A_2} , z_{A_2} – реальная траектория; $x_{A_2} pol$, $z_{A_2} pol$ – аппроксимированная траектория

Fig. 9. Trajectory of the ankle joint motion obtained using a 8th-order polynomial:
1 – position change along the X -axis; 2 – position change along the Z -axis;
 x_{A_2} , z_{A_2} – actual trajectory; $x_{A_2} pol$, $z_{A_2} pol$ – approximated trajectory

Таблица 1. Рассчитанные значения среднеквадратической ошибки**Table 1.** Calculated MSE (meansquare error) values

Метод	Ось	Ошибка
Ряд Фурье 6-го порядка	X	$2,08 \cdot 10^{-6}$
	Z	$9,79 \cdot 10^{-7}$
Ряд Фурье 7-го порядка	X	$1,94 \cdot 10^{-6}$
	Z	$4,49 \cdot 10^{-7}$
Ряд Фурье 8-го порядка	X	$5,18 \cdot 10^{-7}$
	Z	$2,06 \cdot 10^{-7}$
Полином 6-го порядка	X	$2,37 \cdot 10^{-4}$
	Z	$2,45 \cdot 10^{-5}$
Полином 7-го порядка	X	$9,14 \cdot 10^{-5}$
	Z	$1,82 \cdot 10^{-5}$
Полином 8-го порядка	X	$1,51 \cdot 10^{-2}$
	Z	$2,7 \cdot 10^{-3}$
Полином 8-го порядка с ограничением коэффициентов	X	$1,53 \cdot 10^{-4}$
	Z	$1,65 \cdot 10^{-5}$

В связи с полученными результатами вполне логичным решением для построения траектории ходьбы является тригонометрический метод. В результате аппроксимации с помощью функции Фурье N -го порядка была получена

гладкая траектория для каждой характерной точки стопы. Коэффициенты разложения функции представлены в таблицах 2 и 3, графический результат аппроксимации – на рисунках 10 и 11.

Таблица 2. Коэффициенты разложения функции по оси X для точек $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$ **Table 2.** Coefficients of the function expansion along the X-axis for the points $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$

n	Для $x_{A_0}(t)$	
	a_n	b_n
0	0,3	–
1	–0,02	$0,63 \cdot 10^{-2}$
2	–0,005	$0,36 \cdot 10^{-2}$
3	$0,82 \cdot 10^{-2}$	0,02
4	$0,64 \cdot 10^{-2}$	$0,86 \cdot 10^{-4}$
5	$0,21 \cdot 10^{-2}$	$-0,47 \cdot 10^{-2}$
6	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$-0,21 \cdot 10^{-2}$

Окончание табл. 2 / Table 2 (ending)

<i>n</i>	Для $x_{A_1}(t)$	
	a_n	b_n
0	–0,26	–
1	–0,17	1,11
2	0,71	0,31
3	0,19	–0,43
4	–0,18	–0,07
5	–0,03	0,05
	Для $x_{A_2}(t)$	
	a_n	b_n
0	0,23	–
1	–0,21	0,09
2	–0,03	–0,04
3	0,01	$0,42 \cdot 10^{-5}$
	Для $x_{A_3}(t)$	
	a_n	b_n
0	0,24	–
1	–0,22	0,08
2	–0,03	–0,05
3	0,01	$0,26 \cdot 10^{-2}$
	Для $x_{A_4}(t)$	
	a_n	b_n
0	0,34	–
	Для $x_{A_4}(t)$	
	a_n	b_n
1	–0,25	0,08
2	–0,04	–0,06
3	0,01	$–0,49 \cdot 10^{-5}$
	Для $x_{A_5}(t)$	
	a_n	b_n
0	0,47	–
1	0,04	0,02
2	–0,22	–0,14
3	–0,12	$–0,18 \cdot 10^{-2}$

Таблица 3. Коэффициенты разложения функции по оси Z для точек $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$ **Table 3.** Coefficients of the function expansion along the Z -axis for the points $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$

n	Для $z_{A_0}(t)$	
	a_n	b_n
0	0,8	—
1	−0,015	0,02
2	0,013	0,012
3	$0,45 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-2}$
4	$0,79 \cdot 10^{-4}$	$-0,5 \cdot 10^{-2}$
5	$0,28 \cdot 10^{-4}$	$-0,3 \cdot 10^{-2}$
n	Для $z_{A_1}(t)$	
	a_n	b_n
0	0,44	—
1	$-0,72 \cdot 10^{-3}$	0,015
2	$-0,65 \cdot 10^{-3}$	$0,46 \cdot 10^{-2}$
3	$-0,61 \cdot 10^{-2}$	$-0,4 \cdot 10^{-2}$
4	$-0,4 \cdot 10^{-2}$	$-0,4 \cdot 10^{-2}$
5	$-0,47 \cdot 10^{-3}$	$-0,2 \cdot 10^{-2}$
n	Для $z_{A_2}(t)$	
	a_n	b_n
0	0,09	—
1	0,04	$0,11 \cdot 10^{-2}$
n	Для $z_{A_2}(t)$	
	a_n	b_n
2	$-0,27 \cdot 10^{-3}$	$0,46 \cdot 10^{-2}$
3	−0,01	0,02
4	$-0,76 \cdot 10^{-2}$	0,02
5	$-0,1 \cdot 10^{-2}$	$0,89 \cdot 10^{-2}$
6	$0,22 \cdot 10^{-2}$	$0,1 \cdot 10^{-2}$
7	$0,21 \cdot 10^{-2}$	$-0,44 \cdot 10^{-3}$
n	Для $z_{A_3}(t)$	
	a_n	b_n

Окончание табл. 3 / Table 3 (ending)

n	Для $z_{A_3}(t)$	
	a_n	b_n
0	0,12	—
1	0,1	−0,09
2	−0,02	−0,06
3	−0,05	0,02
4	−0,02	0,03
5	$−0,35 \cdot 10^{-2}$	0,02
6	$−0,43 \cdot 10^{-3}$	$0,52 \cdot 10^{-2}$
	Для $z_{A_4}(t)$	
	a_n	b_n
0	0,02	—
1	$0,45 \cdot 10^{-2}$	0,02
2	$0,43 \cdot 10^{-3}$	$0,61 \cdot 10^{-2}$
3	$0,43 \cdot 10^{-3}$	0,01
4	$−0,87 \cdot 10^{-2}$	$0,31 \cdot 10^{-2}$
5	$−0,1 \cdot 10^{-2}$	$−0,2 \cdot 10^{-2}$
6	$−0,95 \cdot 10^{-3}$	$0,17 \cdot 10^{-2}$
7	$−0,16 \cdot 10^{-2}$	$−0,1 \cdot 10^{-2}$
	Для $z_{A_5}(t)$	
	a_n	b_n
0	0,04	—
1	−0,02	0,02
2	$−0,38 \cdot 10^{-2}$	−0,01
3	$0,53 \cdot 10^{-2}$	$0,88 \cdot 10^{-2}$
4	$−0,86 \cdot 10^{-2}$	$0,1 \cdot 10^{-2}$
5	$0,14 \cdot 10^{-2}$	$−0,3 \cdot 10^{-2}$
6	$−0,14 \cdot 10^{-2}$	$0,22 \cdot 10^{-2}$
7	$−0,14 \cdot 10^{-2}$	$−0,2 \cdot 10^{-2}$

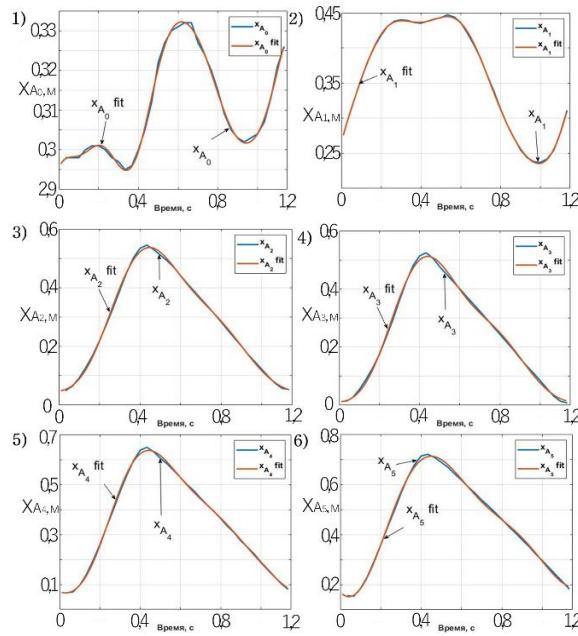


Рис.10. Траектория движения по оси X: 1 – бедренного сустава; 2 – коленного сустава; 3 – голеностопного сустава; 4 – пятоной кости; 5 – плюсненефалангового сустава; 6 – дистальной фаланги пальца плюсненефалангового сустава; *f* – дистальной фаланги пальца

Fig.10. Trajectory of movement along the X-axis: 1 – hip joint; 2 – knee joint joint; 3 – ankle joint; 4 – calcaneus; 5 – metatarsophalangeal joint; 6 – distal phalanx fingerplusnephalangeal joint; *f* – distal phalanx of the finger

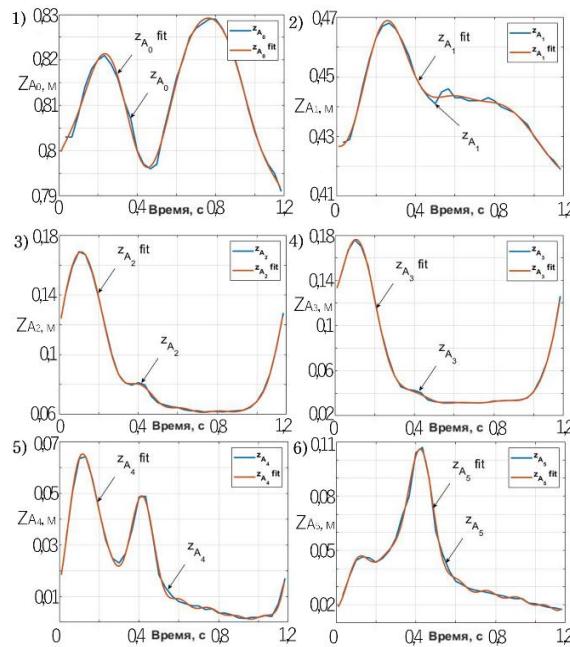


Рис.11. Траектория движения по оси Z: 1 – бедренного сустава; 2 – коленного сустава; 3 – голеностопного сустава; 4 – пятоной кости; 5 – плюсненефалангового сустава; 6 – дистальной фаланги пальца плюсненефалангового сустава; *f* – дистальной фаланги пальца

Fig. 11. Trajectory of movement along the Z axis: 1 – femoral joint; 2 – knee joint; 3 – ankle joint; 4 – calcaneus; 5 – metatarsophalangeal joint; 6 – distal phalanx fingerplusnephalangeal joint; *f* – distal phalanx of the finger

Выводы

Проведенное исследование позволило разработать эффективную методику математического моделирования траекторий движения нижних конечностей. Сравнительный анализ методов аппроксимации выявил преимущество тригонометрического метода (рядов Фурье) перед полиномиальным, что подтверждается значительно меньшими значениями

среднеквадратической ошибки и лучшей сходимостью с экспериментальными данными.

Полученные математические модели разработаны с целью создания систем управления реабилитационной техникой, обеспечивая персонализацию биомеханических паттернов движения с учетом антропометрических характеристик пациентов

Список литературы

1. Оценка эффективности восстановления навыков ходьбы с помощью реабилитационного роботизированного комплекса / И. Э. Юденко, А. И. Попова, Ю. Е. Викторова, Н. В. Минникаева // Северный регион: наука, образование, культура. 2023 № 3 (55). С. 77–83.
2. Yatsun S. M., Yatsun A. S., Rukavitsyn A. N. The creation of a biomechatronic orthopedicdevice for the treatment of flat feet // Biomedical engineering. 2021. Vol. 54, N 5. P. 361–365.
3. Будко Р. Ю., Чернов Н. Н., Будко Н. А. Метод управления устройствами замещения утраченных функций на основе миосигнала и его верификация в реальном масштабе времени // Вестник молодёжной науки России. 2019. № 6. С. 12.
4. Геворкян А. А., Котов С. В., Лиждвой В. Ю. Роботизированная механотерапия: возможность применения экзоскелета для нижних конечностей у пациентов с нарушением функции ходьбы при рассеянном склерозе // Альманах клинической медицины. 2020. № 1. С. 7–12.
5. Куст С. Ю., Маркова М. В., Писарева А. В. Разработка алгоритма определения местности в системе управления протезом нижней конечности // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2021. Т. 20, № 2. С. 99–105.
6. Князев А. А., Яцун С. Ф., Федоров А. В. Управление прибором для механотерапии голеностопного сустава // Медицинская техника. 2022. № 6(336). С. 14.
7. Zaichenko K. V., Gurevich B. S. Spectral processing of bioelectric signals // Medical equipment. 2021. N 1 (325). P. 12–14.
8. Samsonov I., Taratonov I. Modular Scalable System for Registration of Biomedical Indicators of Activity of the Exoskeleton User // Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 647–655.
9. Смирнова Л. М., Пономаренко Г. Н., Суслеев В. Г. Методология и информационно-измерительная система для персонифицированного синтеза протезов нижних

конечностей // Информационно-управляющие системы. 2021. № 6. С. 64–74. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-64-74>

10. Trajectory optimization for wheeled-legged quadrupedal robots using linearized ZMP constraints / Y. De Viragh, M. Bjelonic [et al.] // IEEE Robotics and Automation Letters. 2019. Vol. 4. P. 1633–1640.

11. Котов Е. А., Друк А. Д., Клыпин Д. Н. Разработка экзоскелета нижних конечностей человека для медицинской реабилитации // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 91–97. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2021-178-91-97>

12. Modelling for design and evaluation of industrial exoskeletons: A systematic review / T. Ma, Y. Zhang, S. D. Choi, S. Xiong // Applied Ergonomics. 2023. N 113. P. 104100.

13. Везарко Д. А. Статистический анализ и моделирование данных в MATLAB // International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2024. N 6. P. 187–192. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-6-1-187-192>

14. Влияние роботизированных тренировок на биомеханику голеностопного сустава у пациентов с постинсультным парезом / А. С. Клочков, А. А. Зимин, А. Е. Хижникова, Н. А. Супонева, М. А. Пирадов // Вестник Российского государственного медицинского университета. 2020. № 5. С. 28–32.

15. Жмудь В. А., Димитров Л. В. Вычисление желаемых коэффициентов характеристического уравнения замкнутой системы автоматического управления // Автоматика и программная инженерия. 2016. № 1 (15). С. 58–66.

16. Киселёва В. А., Рыжкова М. Н. Разработка математической модели и алгоритмов для системы построения аппроксимирующего полинома // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022. № 4. С. 69–78.

17. Применение рядов Фурье / Н. А. Юсупов, Ш. Ш. Ахроров, А. Ж. Нормуродов, С. Ш. Амонбоев, Н. Х. Суюнова // Наука, образование и культура. 2025. № 3 (73). С. 1–4.

18. Curve Fitting Toolbox™ User's Guide (R2023a) // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/curvefit/> (дата обращения: 19.09.2025).

References

1. Yudenko I.E., Popova A.I., Viktorova Yu.E., Minnikaeva N.V. Evaluation of the effectiveness of walking skills restoration using a robotic rehabilitation complex. *Severny Region: Nauka, Obrazovanie, Kultura = Northern Region: Science, Education, Culture*. 2023;(3):77–83. (In Russ.)
2. Yatsun S.M., Yatsun A.S., Rukavitsyn A.N. The creation of a biomechatronic orthopedic device for the treatment of flat feet. *Biomedical Engineering*. 2021;54(5):361–365.
3. Budko R.Yu., Chernov N.N., Budko N.A. A method for controlling lost function replacement devices based on myosignal and its real-time verification. *Bulletin of Youth Science of Russia = Vestnik Molodezhnoy Nauki Rossii*. 2019;(6):12. (In Russ.)

4. Gevorkyan A.A., Kotov S.V., Lizhdva V.Yu. Robotic mechanoterapia: the possibility of using an exoskeleton for the lower extremities in patients with impaired walking function in multiple sclerosis. *Al'manakh klinicheskoi meditsiny = Almanac of Clinical Medicine*. 2020;(1):7–12. (In Russ.)
5. Bush S.Yu., Markova M.V., Pisareva A.V. Development of an algorithm for determining the terrain in the management system of a prosthetic lower limb. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2021;20(2):99–105. (In Russ.)
6. Knyazev A.A., Yatsun S.F., Fedorov A.V. Control of the ankle joint mechanic-rapy device. *Meditinskaya tekhnika = Medical Equipment*. 2022;6(336):14. (In Russ.)
7. Zaichenko K.V., Gurevich B. S. Spectral processing of bioelectric signals. *Medical equipment*. 2021;(1):12–14.
8. Samsonov I., Taratonov I. Modular Scalable System for Registration of Biomedical Indicators of Activity of the Exoskeleton User. In: *Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software*. Cham: Springer International Publishing; 2022. P. 647–655.
9. Smirnova L.M., Ponomarenko G.N., Suslyakov V.G. Methodology and information and measuring system for personalized synthesis of prostheses of lower limbs. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*. 2021;(6):64–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-64-74>
10. Viragh Y. De, Bjelonic M., et al. Trajectory optimization for wheeled-legged quadrupedal robots using linearized ZMP constraints. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019;4:1633–1640.
11. Kotov E.A., Druk A.D., Klypin D.N. Development of the exoskeleton of the lower necessities of man for medical rehabilitation. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2021;(4):91–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2021-178-91-97>
12. Ma T., Zhang Y., Choi S.D., Xiong S. Modelling for design and evaluation of industrial exoskeletons: A systematic review. *Applied Ergonomics*. 2023;(113):104100.
13. Vezarko D.A. Statistical analysis and modeling in MATLAB. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024;(6):187–192. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-6-1-187-192>
14. Klochkov A.S., Zimin A.A., Khizhnikova A.E., Suponeva N.A., Piradov M.A. The effect of robotic training on ankle biomechanics in patients with post-stroke paresis. *Vestnik Rossiiskogo gosudarstvenno-go meditsinskogo universiteta = Bulletin of the Russian State Medical University*. 2020;(5):28–32. (In Russ.)
15. Zhmud V.A., Dimitrov L.V. Calculation of the desired coefficients of the characteristic equation of a closed automatic control system. *Avtomatika i programmnaya inzheneriya = Avtomatics and Software Engineering*. 2016;(1):58–66. (In Russ.)

16. Kiseleva V.A., Ryzhkova M.N. Development of a mathematical model and algorithms for the approximation polynomial construction system. *Radiotekhnicheskie i telekomunikatsionnye sistemy = Radio and Telecommunication Systems*. 2022;(4):69–78. (In Russ.)
17. Yusupov N.A., Akhrorov Sh.Sh., Normurodov A.Zh., Amonboev S.Sh., Suyunova N.Kh. Application of Fourier series. *Nauka, obrazovanie i kul'tura = Science, Education and Culture*. 2025;(3):1–4. (In Russ.)
18. Curve Fitting Toolbox™ User's Guide (R2023a). MathWorks. Available at: <https://www.mathworks.com/help/curvefit/> (accessed 19.09.2025).

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Сергей Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru, Researcher ID: 109404, ORCID: 0000-0002-7420-0772

Фурсов Гавриил Анатольевич, магистрант кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: from.skveki1@mail.ru, ORCID: 0009-0002-1889-4586

Сидорова Алина Александровна, студент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: limonadni1.jam@gmail.com

Sergey F. Yatsun, Doctor of Sciences (Engineering), Professor at the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru, Researcher ID: 109404, ORCID: 0000-0002-7420-0772

Gavril A. Fursov, Undergraduate of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: from.skveki1@mail.ru, ORCID: 0009-0002-1889-4586

Alina A. Sidorova, Student of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: limonadni1.jam@gmail.com

Оценка возможности применения квантовой криптографии и протокола LoRaWAN 2 для установления связи с беспилотным летательным аппаратом

М. Ю. Алемпьев¹, Д. С. Коптев¹✉, В. Г. Довбня¹, М. О. Ревякина²

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева
ул. Комсомольская, д. 95, г. Орёл 302026, Российская Федерация

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Современные беспилотные летательные аппараты сталкиваются с проблемами устойчивой связи в условиях радиопомех, сложного рельефа (горы, леса) или активного радиоэлектронного подавления. Одним из возможных решений данной проблемы является применение принципов квантовой криптографии в сочетании с новейшими протоколами связи, такими как LoRaWAN2, способствующими обеспечению защищённой и стабильной передачи данных в сложных условиях.

Целью исследования является оценка возможности применения квантовой криптографии и протокола LoRaWAN 2 для установления и поддержания постоянной устойчивой связи с беспилотным летательным аппаратом.

Методы исследования основаны на понятиях теории статистической радиотехники, теории распространения радиоволн ультракомпактного диапазона. Использованы методы многокритериального анализа, параметрического и структурного синтеза. Проанализированы принципы передачи информации с беспилотных летательных аппаратов. Проведена критическая оценка характеристик БПЛА с применением квантовой криптографии и протокола LoRaWAN 2.

Результаты. Приведены аналитические выражения и сравнительные характеристики для оценки перспектив применения квантовой криптографии и протокола LoRaWAN 2 с беспилотными летательными аппаратами. Показано, что при использовании квантовой криптографии вероятность перехвата данных в канале связи с БПЛА составляет примерно 1%, что существенно увеличивает его защищенность в отличие от RSA-2048. Квантовая криптография улучшает безопасность БПЛА и получение ключа при незначительном увеличении массы, энергопотребления и скорости. В ближайшие годы с развитием компактных систем её перспективное внедрение станет стандартом для коммерческих дронов.

Заключение. В качестве перспективных направлений исследований и применения в области использования беспилотных летательных аппаратов следует рассматривать применение технологии квантовой криптографии и протокола LoRaWAN 2, способствующие повышению характеристик БПЛА: большую дальность, энергоэффективность, безопасность и масштабируемость.

Ключевые слова: квантовая криптография; воздушная среда передачи данных; беспилотный летательный аппарат; канал передачи данных; воздействие радиопомех; стандарт связи; пропускная способность канала.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Оценка возможности применения квантовой криптографии и протокола LoRaWAN 2 для установления связи с беспилотным летательным аппаратом / М. Ю. Алемпьев, Д. С. Коптев, В. Г. Довбня, М. О. Ревякина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 4. С. 107–122 <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-107-122>

Поступила в редакцию 07.10.2025

Подписана в печать 04.11.2025

Опубликована 26.12.2025

Evaluation of the possibility of using quantum cryptography and the LoRaWAN 2 protocol to establish communication with an unmanned aerial vehicle

Mikhail Y. Alempiev¹, Dmitry S. Koptev¹✉, Vitaly G. Dovbnya¹,
Maria O. Revyakina¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

² Orel State University named after I. S. Turgenev
95 Komsomol'skaya Str., Orel 302026, Russian Federation

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Modern unmanned aerial vehicles face challenges in maintaining reliable communications in the face of radio interference, difficult terrain (mountains, forests), or active electronic countermeasures. One possible solution to this problem is the application of quantum cryptography principles in combination with the latest communication protocols, such as LoRaWAN 2, which help ensure secure and stable data transmission in challenging environments. The Purpose of the research is to evaluate the feasibility of using quantum cryptography and the LoRaWAN 2 protocol to establish and maintain continuous, stable communication with an unmanned aerial vehicle.

Methods. The research methods are based on concepts from statistical radio engineering theory and ultra-high-frequency radio wave propagation theory. Multicriteria analysis, parametric synthesis, and structural synthesis methods are used. The principles of information transmission from unmanned aerial vehicles are analyzed. A critical assessment of the performance of a UAV using quantum cryptography and the LoRaWAN 2 protocol is conducted.

Results. Analytical expressions and comparative characteristics are presented to assess the potential for using quantum cryptography and the LoRaWAN 2 protocol with unmanned aerial vehicles. It is shown that using quantum cryptography, the probability of data interception in a UAV communication channel is approximately 1%, significantly increasing its security compared to RSA-2048. Quantum cryptography improves UAV security and key retrieval with a slight increase in weight, power consumption, and speed. In the coming years, with the development of compact systems, its promising implementation will become the standard for commercial drones.

Conclusion. As promising areas of research and application in the field of using unmanned aerial vehicles, the use of quantum cryptography technology and the LoRaWAN 2 protocol should be considered, which contributes to improving the characteristics of UAVs: high range, energy efficiency, security and scalability.

Keywords: quantum cryptography; air data transmission medium; unmanned aerial vehicle; data transmission channel; exposure to radio interference; communication standard; channel capacity.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Alempiev M.Y., Koptev D.S., Dovbnya V.G., Revyakina M.O. Evaluation of the possibility of using quantum cryptography and the LoRaWAN 2 protocol to establish communication with an unmanned aerial vehicle. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoje priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(4):107–122. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-107-122>

Received 07.10.2025

Accepted 04.11.2025

Published 26.12.2025

Введение

Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) обладают возможностью адаптации к выполнению различных задач по обслуживанию гражданской инфраструктуры. Однако их эффективность зависит от условий использования и технических характеристик самого БПЛА. В условиях ограниченности заряда батареи, сложности управления, наличия помех и непредсказуемости среды их применение может быть неэффективным.

Рассмотрим типовые характеристики БПЛА DJI Phantom 4 Pro, часто используемого для выполнения задач сотрудниками спасательных служб и сотрудниками полиции. Рассматриваемый дрон обладает дальностью полета в 4,5 км при условии хорошей видимости и скорости полета 72 км/ч, временем полета – 30–40 мин при стандартной массе в 1,2 кг и высотой полета до 500 м. Также DJI Phantom 4 Pro способен выполнять поставленные задачи в условиях дождя, снега, тумана и скорости ветра до 15 м/с. Емкость аккумуляторной батареи дрона составляет 4400 мАч. Для мониторинга на дроне используется камера с высоким разрешением 4К (4096×2160) при битрейте в 100 Мбит/с и видеокодеком H.264, способная

снимать в режиме 4К/60 кадров в секунду с поддержкой угла обзора в 360 градусов, однако, данные характеристики актуальны только при использовании режима автономного управления дроном.

В режиме дистанционного управления БПЛА поддерживает видео в максимальном разрешении 1080р (1920×1080) с частотой кадров 60 кадров в секунду и битрейтом в 10 Мбит/с, но дальность полета ограничена 5 км. При использовании разрешения 720р (1280×720) максимальная дальность может быть увеличена до 10 км. Передача данных с БПЛА в обоих случаях на пульт дистанционного управления (ПДУ) происходит на частоте 2,4 ГГц с использованием частотно-импульсной модуляции, что существенно ограничивает дальность полета в режиме дистанционного управления.

Вероятность битовой ошибки при использовании БПЛА в идеальных условиях при дистанционном управлении может достигать 5%, в автономном режиме – до 20%. Основной причиной роста вероятности ошибки является использования записи и передачи видеоданных различного разрешения с БПЛА: чем выше качество передаваемой информации, тем выше вероятность ошибки [1].

Обеспечение безопасности передачи данных между БПЛА и ПДУ – это ключевой фактор, обеспечивающий выполнение поставленных задач дроном, особенно при выполнении операций сотрудниками государственных служб. Рассмотрим несколько методов увеличения безопасности канала связи.

Шифрование данных – это метод защиты информации, основанный на использовании ключей шифрования информации, который позволяет повысить защищенность доступа к информации. Однако к минусам можно отнести то, что требуются высокие вычислительные мощности и скорости передачи данных, а также существует зависимость от ключей, которые могут быть взломаны.

Использование протоколов безопасности – это метод защиты информации, основанный на использовании протоколов, которые реализуют шифрование, аутентификацию и защиту от атак. К минусам можно отнести зависимость от стабильного канала передачи данных, снижение скорости передачи данных, сложности настройки работы с протоколами.

Использование методов проверки целостности – это метод защиты информации, основанный на использовании контроля за неизменностью данных при передаче. К минусам можно отнести снижение скорости передачи данных из-за обращения к сторонним серверам для проверки, наличие поддержки сторонних серверов, возможность взлома ключей проверки целостности [2].

Использование методов синхронизации – этот метод защиты информации позволяет обеспечить точную синхро-

низацию между БПЛА и ПДУ, а также минимизировать задержки. К минусам относятся наличие зависимости от GPS, которая отвечает за синхронизацию, снижение скорости передачи данных из-за обращения к сторонним серверам для проверки, наличие поддержки сторонних серверов.

Использование методов защиты от ошибок – этот метод защиты информации использует коды коррекции ошибок для исправления ошибок при передачи данных. К минусам относятся увеличение объема передаваемых данных из-за наличия кодов коррекции, а также увеличение времени передачи данных из-за процессов по исправлению передаваемой информации.

Квантовая криптография – это метод защиты информации, основанный на принципах квантовой механики. В отличие от классической криптографии, которая опирается на сложность математических задач (например, факторизацию больших чисел), квантовая криптография использует фундаментальные свойства квантовых частиц (например, фотонов) для создания абсолютно защищенных каналов связи [3].

Рассмотрим основные принципы квантовой криптографии и следствия из них:

1. Принцип квантовой неопределенности (принцип Гейзенберга) позволяет говорить о невозможности измерить квантовое состояние частицы (например, поляризацию фотона), не изменив его, а, следовательно, любая попытка перехвата информации о квантовом ключе будет обнаружена.

2. Принцип квантовой запутанности позволяет говорить о том, что две частицы могут быть связаны так, что изменение состояния одной мгновенно влияет на другую, независимо от расстояния (используется в протоколах распределения квантовых ключей (например, E91)) [4].

3. Принцип невозможности клонирования (теорема о запрете клонирования), суть его заключается в том, что невозможно создать точную копию неизвестного квантового состояния. Данное обстоятельство позволяет предотвратить атаки типа «человек посередине» (MITM) [5].

Преимущества квантовой криптографии:

- абсолютная безопасность – защита основана на законах физики, а не на вычислительной сложности;
- обнаружение подслушивания – любые попытки перехвата ключа оставляют следы;
- устойчивость к квантовым компьютерам – в отличие от RSA и ECC, которые могут быть взломаны алгоритмом Шора и др. [6].

Ограничения и проблемы квантовой криптографии:

- ограниченная дальность (около 100–500 км по оптоволокну, до 120 км через свободное пространство);
- высокая стоимость оборудования (однофотонные детекторы, квантовые повторители);
- уязвимость к атакам на реализацию (например, лазерное ослепление детекторов) [7].

Материалы и методы

БПЛА DJI Phantom 4 Pro способен достигнуть дальности полета в 4,5 км, так как работает на частоте 2,4 ГГц (стандарт Wi-Fi). В качестве альтернативного канала связи возможно использование сетей 5G и стандартов LoRaWAN.

5G/LTE-М позволяет обеспечить широкий радиус действий и высокую скорость передачи данных с БПЛА на ПДУ, однако требуется постоянное подключение к мобильной сети, что, например, в условиях проведения спасательных операций в удаленных районах невозможно.

Использование системы передачи данных по стандарту LoRaWAN 2 позволяет расширить радиус зоны управления дроном до 100 км, но имеет ограничение в пропускной способности канала, что ограничивает возможность получения видеоданных путем передачи через радиоканал связи.

Перспективным является использование стандарта LoRaWAN 2 в качестве дополнительного источника передачи данных между БПЛА и ПДУ, который позволяет расширить радиус полета максимально в теории до 100 км без использования мобильных сетей связи. Рассмотрим более подробно характеристики и возможности стандарта LoRaWAN 2.

LoRaWAN 2 – это эволюция оригинального протокола LoRaWAN 1, разработанного LoRa Alliance. Основная цель обновления – улучшение безопасности, энергоэффективности, масштабируемости

и поддержки новых сценариев использования (например, промышленного IoT (Internet of Things), умных городов).

LoRaWAN 2 поддерживает две версии протокола (1.x и 2.x) и использует LR-FHSS (Long Range Frequency Hopping Spread Spectrum):

- альтернатива LoRa для восходящего канала (UL);
- устойчивость к помехам за счет частотного скачкообразного расширения спектра;
- поддержка высокой плотности устройств (до 1 млн на гектар);
- скорость передачи до 100 кбит/с.

LoRaWAN 2 позволяет уменьшить затраты на энергопотребление устройством:

- адаптивное управление мощностью передачи (ADR+);
- оптимизация циклов сна (меньше служебных сообщений).

Также стандарт поддерживает IPv6 – возможность прямой интеграции с Интернетом (без шлюзовых преобразований) [8].

Устройства по стандарту LoRaWAN 2 возможно применять в сложных условиях:

- сложно-рельефная местность (горы, леса) – сигнал LoRaWAN проходит через препятствия лучше, чем Wi-Fi или Bluetooth;
- демонстрирует высокую устойчивость к атмосферным помехам;
- обладает высокой спектральной и энергетической скрытностью, что обеспечивает высокую защищенность от преднамеренных помех.

LoRaWAN 2 использует двухключевую схему аутентификации (Network Session Key + Application Session Key) и улучшенное шифрование. На рисунке 1 представлено шифрование AES в LoRaWAN.

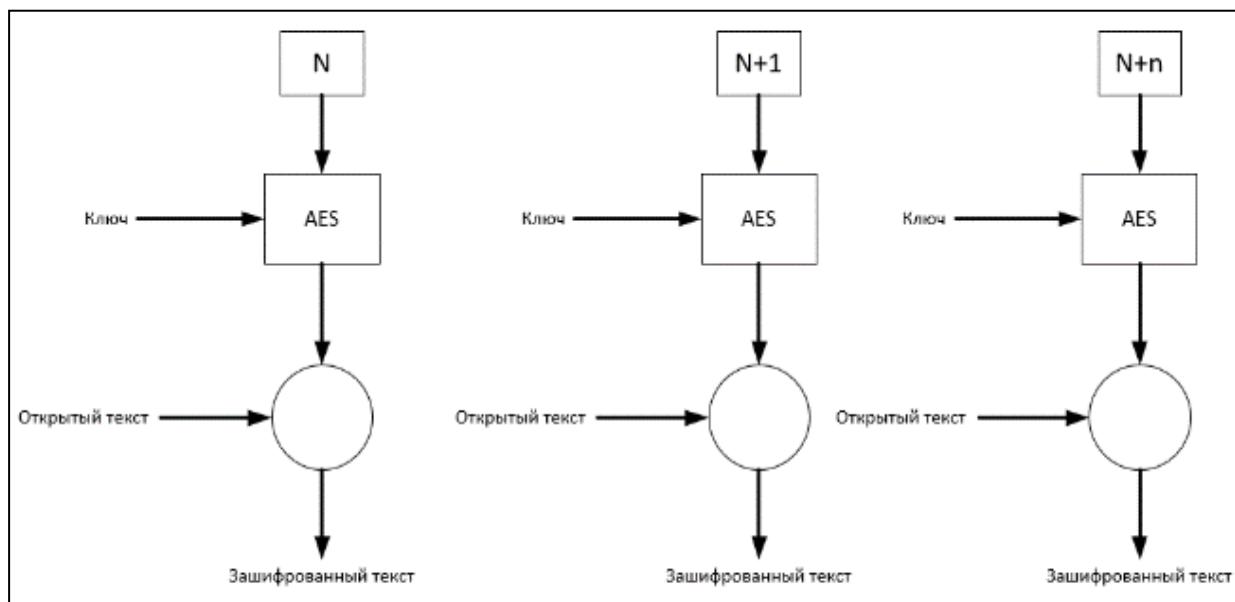


Рис. 1. Шифрование AES-256 в LoRaWAN 2

Fig. 1. AES-256 encryption in LoRaWAN 2

Взлом LoRaWAN требует перебора 2^{128} комбинаций (AES-128) $\rightarrow 2^{256}$ (AES-256), однако, в отличие от использования квантовой криптографии, возможен.

По сравнению с Wi-Fi (WPA2/WPA3), LoRaWAN 2 не требует постоянного обмена ключами. БПЛА с LoRaWAN 2 защищён от атак типа «человек посередине» и перехвата данных.

Масштабируемость LoRaWAN 2 позволяет поддерживать тысячи устройств на

одну базовую станцию благодаря использованию ALOHA-протокол с частотным и временным разделением каналов.

Одна базовая станция поддерживает десятки тысяч устройств (в теории). На рисунке 2 отображено взаимодействие БПЛА при использовании дронов ретрансляторов с протоколом LoRaWAN.

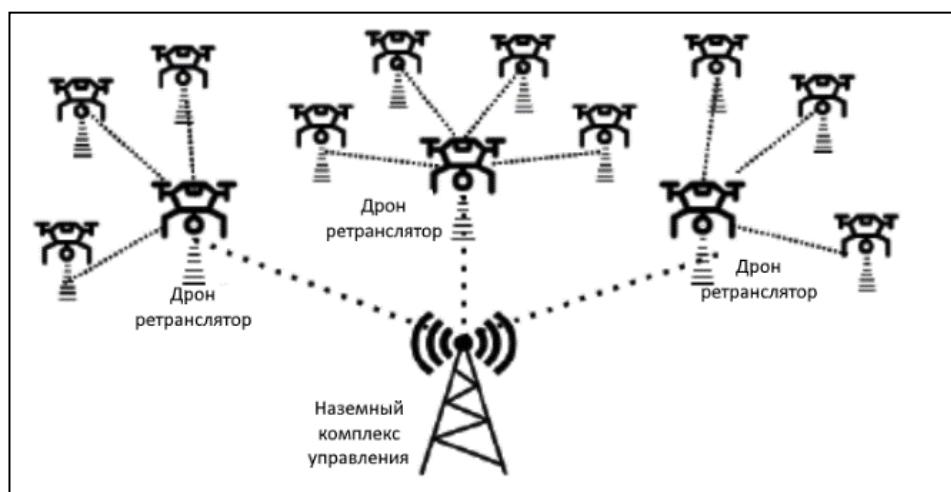


Рис. 2. Масштабируемость связи при использовании протокола LoRaWAN

Fig. 2. Communication scalability when using the LoRaWAN protocol

Для сравнения: Wi-Fi (даже в mesh-сетях) – до 200–300 устройств. LoRaWAN 2 позволяет управлять роем БПЛА без перегрузки сети [9].

LoRaWAN используется LoRa модуляцию (чрезвычайно низкочастотная модуляция) и работает на субгигагерцовых частотах (868 МГц в Европе, 915 МГц в США), что обеспечивает большую дальность и имеет следующие характеристики:

- дальность LoRaWAN 2 в городских условиях – 5–10 км;

- дальность в открытой местности – до 100 км;

- Wi-Fi (2,4/5 ГГц) – до 300 м (в идеальных условиях);

- Bluetooth Low Energy (BLE) – до 100 м.

LoRaWAN 2 позволяет БПЛА работать на больших расстояниях без потери связи, что критично для мониторинга сельхозугодий, ЛЭП и других протяжённых объектов [10].

LoRaWAN 2 поддерживает Adaptive Data Rate (ADR), автоматически подстра-

ивая скорость передачи под условия связи:

- чувствительность приёмника LoRa – до -148 дБм (для SF12);
- устойчивость к замираниям (благодаря технологии Chirp Spread Spectrum CSS).

БПЛА с LoRaWAN 2 менее подвержен помехам от других радиоустройств, чем Wi-Fi/BLE.

Примерами успешного использования БПЛА с сенсорами и датчиками LoRaWAN являются: организация автономной видеосъёмки удаленной местности; передачи данных с датчиком, установленных на БПЛА, при мониторинге местности; обеспечение логистики в удалённых районах (доставка медикаментов, оборудования, небольших грузов); организация непрерывного мониторинга критической инфраструктуры (линий электропередач, трубопроводов, объектов инфраструктуры жизнеобеспечения).

Квантовая криптография (например, протоколы QKD – Quantum Key Distribution) обеспечивает абсолютную защиту от перехвата ключей шифрования, что критически важно для БПЛА, работающих в условиях киберугроз.

Совместное применение квантовой криптографии и LoRaWAN 2 позволяет создавать и использовать БПЛА с защищённым каналом связи (невозможностью перехвата данных) и устойчивой работой в условиях радиоэлектронной борьбы. Подобное совместное использование позволит увеличить дальность действия БПЛА на защищенном канале

связи до 100 км и сотен километров с применением mesh-ретрансляции [11].

Результаты и их обсуждение

Оценим возможность интеграции дополнительного передатчика связи по стандарту LoRaWAN 2 с использованием квантовой криптографии. В качестве примера базового БПЛА рассматриваем DJI Phantom 4 Pro.

Квантовая криптография (например, протоколы QKD – Quantum Key Distribution) обеспечивает абсолютную защиту от перехвата ключей шифрования, что критически важно для БПЛА, работающих в условиях киберугроз. Рассмотрим влияние внедрения квантовой криптографии в канал связи на ключевые параметры БПЛА с целью улучшения безопасности без значительного увеличения массы и энергопотребления [12].

Исходные данные для расчета влияния применения квантовой криптографии на БПЛА:

1. Традиционная криптография (алгоритм AES-256): вычислительная нагрузка составляет примерно 100 мВт, типичный чип имеет массу до 10 г и теоретически взламывается квантовыми компьютерами (алгоритм Шора) [13].

2. Квантовая криптография (QKD, например, BB84): вычислительная нагрузка составляет от 200 до 500 мВт, чип имеет массу от 50 до 100 г (миниатюрные системы для БПЛА), безопасность обеспечивается законами квантовой физики (невозможность клонирования состояния).

Оценка влияния на массу, энергопотребление, скорость работы БПЛА:

1. Прирост массы:

$$\Delta m = 1200 + 100 = 1300 \text{ г.}$$

Для БПЛА массой 1,2 кг это увеличение массы на 8%, что некритично.

2. Прирост энергопотребления:

$$\Delta P = \frac{4400}{0,5} + 500 = 9300 \text{ мВт} \cdot \text{ч},$$

где 4400 мАч – емкость аккумуляторной батареи; 0,5 ч – время работы БПЛА.

Для БПЛА с энергопотребление 8800 мВт·ч минимальное время работы сократится на 7% (примерно 28 мин), что приемлемо.

3. Изменение скорости:

$$v = 72 \cdot \frac{1200}{1300} = 66,46 \text{ км} \cdot \text{ч.}$$

Для БПЛА с изначальной скоростью 72 км/ч сократится максимальная скорость на 8%, что приемлемо.

На основании расчета можно сделать вывод, что такие параметры, как масса, энергопотребление и скорость, изменятся в пределах до 10%.

Оценка риска перехвата данных проводится на основании следующих исходных данных: вероятность перехвата классического RSA-2048: $\sim 10^{-3}$ (при атаке методом brute force + side-channel); вероятность перехвата QKD: $\sim 10^{-20}$ (невозможно без изменения квантового состояния).

Таким образом, для БПЛА, передающего данные каждые 10 с, за 1 ч (360 передач) вероятность перехвата данных составит:

– при использовании классической криптографии:

$$P_{\text{ош}} = 1 - (1 - 10^{-3})^{360} \approx 30\%,$$

где 10^{-3} – вероятность перехвата данных при использовании RSA-2048; 360 – количество передач сигналов за 1 ч;

– при использовании алгоритма квантовой криптографии QKD:

$$P_{\text{ош}} = 1 - (1 - 10^{-20})^{360} \approx 1\%,$$

где 10^{-20} – вероятность перехвата данных при использовании QKD; 360 – количество передач сигналов за 1 ч;

На основании расчета можно сделать вывод, что при использовании квантовой криптографии вероятность перехвата данных в канале связи составляет примерно 1%, что существенно увеличивает защищенность канала в отличие от RSA-2048 с вероятностью примерно 30%.

Рассмотрим влияние на настройку канала передачи данных при использовании квантовой криптографии.

Исходные данные для расчета влияния применения квантовой криптографии на БПЛА:

– время установки ключа RSA-2048: ~ 100 мс;

– время установки ключа QKD: ~ 1 мс (для современных систем) [13].

При использовании квантовых сетей ключи распределяются мгновенно (прирост 100% по сравнению с классическими методами обмена ключами по открытому каналу).

Рассмотрим влияние использования протокола LoRaWAN 2 на параметры БПЛА. Оценку возможно произвести по некоторым ключевым аспектам: масса,

энергопотребление, дальность связи, по-
мехоустойчивость.

Оценка влияния на массу, энергопо-
требление, скорость работы БПЛА:

1. SMD чип LoRaWAN 2 имеет
массу 10 г. Прирост массы с учетом чипа
квантовой криптографии составит

$$\Delta m = 1300 + 10 = 1310 \text{ г.}$$

Для БПЛА массой 1,3 кг это увели-
чение составит менее 1%, что некри-
тично. Общее увеличение массы от ис-
ходной DJI Phantom 4 Pro составит менее
9%.

2. LoRaWAN 2 оптимизирован для
работы с низким энергопотреблением
(LPWAN), что является главной особен-
ностью протокола.

Типичное энергопотребление LoRa-
модуля, встраиваемого в БПЛА:

- $\sim 10 \text{ мВт}\cdot\text{ч}$ при передаче (на мощ-
ности $+14 \text{ дБм}$);
- потребление в режиме ожидания
 $\sim 0,1 \text{ мВт}\cdot\text{ч}$.

Сравнение с Wi-Fi/Bluetooth моду-
лями БПЛА:

- Wi-Fi (в режиме передачи) – $\sim 50–100 \text{ мВт}\cdot\text{ч}$;
- Bluetooth Low Energy (BLE) – $\sim 10–30 \text{ мВт}\cdot\text{ч}$ (но меньшая дальность) [14].

Прирост энергопотребления с уче-
том наличия чипа квантовой криптогра-
фии:

$$\Delta P = 9300 + 10 = 9310 \text{ мВт}\cdot\text{ч.}$$

Для БПЛА с энергопотребление
9310 мВт·ч минимальное время работы
сократится на 7–8% (примерно 27 мин)
от изначальных 30 мин, что приемлемо.

3. С учетом применения протокола
LoRaWAN 2 для управления БПЛА, кото-
рый теоретически способен организо-
вать передачу данных на 100 км, прове-
дем расчет дальности полета БПЛА от
ПДУ:

$$S = 66,46 \cdot 0,45 = 29,91 \text{ км}\cdot\text{ч.}$$

Для БПЛА с изначальной дально-
стью полета 4,5 км прирост максималь-
ного расстояния составит на 664,7%, что
является существенным показателем.

4. LoRaWAN 2 работает на частотах
868 МГц (Европа), 915 МГц (США),
928 МГц (Азия), которые имеют хоро-
шую помехозащищенность, так как
имеют низкую проницаемость для по-
мех.

5. Для модуляции LoRa с исполь-
зованием квантового кодирования и ис-
правлением ошибок вероятность бито-
вой ошибки может быть оценена по фор-
муле

$$P_b \approx 0,5 \cdot Q(\sqrt{SNR \cdot 2^{SF+1}} - \\ - \sqrt{1,386 \cdot SF + 1,154}),$$

где SNR – отношение сигнал/шум; SF –
коэффициент расширения спектра; Q –
квадратурная составляющая [15].

SNR имеет диапазон от 1,5 дБ до 3 дБ,
в зависимости от уменьшения коэффици-
ента расширения спектра от 12 до 7.

При требуемом отношении SNR на 3
дБ вероятность битовой ошибки BER
примерно равна 10^{-3} , или 0,1% [16].

Рассмотрим результаты влияния
квантовой криптографии (QKD) и прото-
кола LoRaWAN 2 на характеристики
БПЛА (табл. 1 и 2).

Таблица 1. Влияния QKD на БПЛА**Table 1.** Effects of QKD on UAVs

Параметр	Классическая криптография	Квантовая криптография	Изменение
Безопасность	Уязвима к квантовым атакам	Абсолютная защита	+100%
Масса БПЛА	1200 г	1300 г	+100 г
Энергопотребление	8800 мВт	9300 мВт	+500 мВт
Скорость	72 км/ч	66,46 км/ч	-5,54 км/ч
Задержка ключа	100 мс	1 мс	100 раз быстрее

Таблица 2. Влияния LoRaWAN 2 и QKD на БПЛА в сравнении с Wi-Fi/BLE**Table 2.** Impact of LoRaWAN 2 and QKD on UAVs compared to Wi-Fi/BLE

Параметр	LoRaWAN 2	Wi-Fi / BLE	Изменение
Масса ЛА	1310 г	1200 г	На 110 г увеличена
Энергопотребление	9310 мВт	8800 мВт	Увеличено на 6%
Дальность	29,91 км	4,5 км	Увеличено на 664,7%
Помехоустойчивость	CSS + ADR	Чувствителен к помехам	Сложнее взломать
Вероятность ошибки	0,1%	5%	Уменьшено на 4,9%

Квантовая криптография (QKD) улучшает безопасность БПЛА и получение ключа при незначительном увеличении массы, энергопотребления и скорости. В ближайшие годы с развитием компактных QKD-систем её перспективное внедрение станет стандартом для коммерческих дронов.

LoRaWAN 2 обеспечивает большую дальность, меньшую вероятность ошибки, помехоустойчивость при незначительном увеличении энергопотребления по сравнению с Wi-Fi и BLE, что делает его идеальным выбором для БПЛА в качестве способа связи на расстояния до 30 км [17].

Выводы

Таким образом, обобщая вышеизложенное, можно сделать следующие выводы:

- LoRaWAN 2 оптимизирован для низкого энергопотребления и в сочетании с квантовой криптографией энергопотребление БПЛА некритично увеличивается, что является важным фактором для БПЛА с ограниченным запасом батареи;
- дальность связи LoRaWAN (до 100 км в открытой местности) позволяет БПЛА увеличить радиус действия и работать на больших расстояниях без потери сигнала;

- LoRaWAN поддерживает тысячи устройств в одной сети, что полезно для роевых систем БПЛА;
- использование БПЛА с LoRaWAN 2 снижает вероятность ошибки в 5 раз;
- квантовая криптография устраняет расходы (такие как дополнительное энергопотребление, увеличение передаваемых данных, скорость передачи, скорость настройки ключей) на сложные системы шифрования, так как защита встроена на физическом уровне;
- квантовая криптография обеспечивает абсолютную защиту от перехвата благодаря принципам квантовой механики;
- даже при попытке взлома злоумышленник оставит следы, и полученный сигнал моментально сообщит о вмешательстве, что делает систему устойчивой к атакам;
- в сочетании с LoRaWAN 2 обеспечивается двойная защита данных от перехвата информации и пагубного влияния помех.

Внедрение квантовой криптографии и LoRaWAN 2 делает БПЛА более живучими в сложных условиях на дальних расстояниях от ПДУ, открывая новые возможности для спасательных, поисковых и коммерческих операций.

Использование протокола LoRaWAN 2 для передачи видеоданных при мониторинге на БПЛА является нецелесообразно из-за ограничений в пропускной способности канала связи в 100 кбит/с, однако, данного канала связи достаточно для управления и передачи команд для выполнения автономных задач дроном.

Результаты указывают на перспективу применения комбинации квантовой криптографии (максимальная защищенность канала связи) и LoRaWAN 2 (дальность + энергоэффективность), которая делает БПЛА идеальной платформой для защищённой, автономной и масштабируемой связи с возможностью выполнять различные задачи.

Список литературы

1. Кузнецова И. А., Гильязов М. Р. Влияние высоты полета беспилотного летательного аппарата при обработке данных в автоматизированных программных обеспечениях // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet». 2021. № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-vysoty-poleta-bespilotnogo-letalnogo-apparata-pri-obrabotke-dannyh-v-avtomatizirovannyh-programmnyh-obespecheniyah> (дата обращения: 10.09.2025).
2. Скрыпников А. В., Денисенко В. В., Евтеева К. С. Защита данных при передаче по беспроводным каналам связи // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2019. № 8-2. С. 35–38.
3. Паринов М. В., Ветохин В. В., Фёдоров С. М. Анализ возможностей и методика модернизации систем управления, навигации и связи беспилотных летательных аппаратов промышленного назначения на примере изделий фирмы DJI // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. № 6. С. 147–155.
4. Булатова А. Р. Квантовая криптография и квантовые вычисления // Вестник Пензенского государственного университета. 2025. № 1 (49). С. 11–14.

5. Букашkin С. А., Черепнев М. А. Квантовые устройства в криптографии // International Journal of Open Information Technologies. 2023. Vol. 11, N 1. P. 104–108.
6. Выдрин Д. Ф., Ситдиков Д. Р. Основные параметры беспроводной технологии LoRaWAN // Academy. 2019. № 2 (41). С. 22–24.
7. Муртазин М. М. Безопасность данных энергоэффективной сети LORAWAN // Электронная наука. 2022. № 2. С. 2–8.
8. Олейникова А. В., Сурудин Д. С., Шафеев Д. Е. Квантовые компьютеры: надежды и реальность // Перспективы развития информационных технологий. 2016. № 30. С. 145–153.
9. Довгаль В. А. Интеграция сетей и вычислений для построения системы управления роем дронов как сетевой системы управления // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2022. № 1 (296). С. 62–76.
10. Довгаль В. А., Османи К. А. Разработка системы расширения дальности беспилотного летательного аппарата с помощью технологии беспроводной связи LORA // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2022. № 3 (306). С. 69–76.
11. Муртазин М. М. Безопасность данных энергоэффективной сети LORAWAN // Электронная наука. 2022. № 2. С. 2–8.
12. Серикова Ю. И., Малыгина Е. А. Уязвимости криптографических систем с различными протоколами квантового распределения ключа и ключевая роль биометрии в квантовой криптографии // Universum: технические науки. 2017. № 11 (44). С. 13–15.
13. Олейникова А. В., Сурудин Д. С., Шафеев Д. Е. Квантовые компьютеры: надежды и реальность // Перспективы развития информационных технологий. 2016. № 30. С. 145–153.
14. Оценка возможности применения канала радиосвязи для передачи видеинформации между беспилотным подводным аппаратом и пультом дистанционного управления / М. Ю. Алемпьев, А. Е. Семенова, Д. С. Коптев, В. Г. Довбня // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 1. С. 64–78. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-64-78>
15. Оценка дальности полёта и передачи видеинформации при мониторинге чрезвычайных ситуаций с беспилотного летательного аппарата в сложных метеорологических условиях / М. Ю. Алемпьев, А. Е. Семенова, Д. С. Коптев, В. Г. Довбня // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 21–39. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-21-39>
16. Леушин А. В. LoRa как новый вид модуляции. Принцип работы, основные параметры, помехоустойчивость // Техника радиосвязи. 2022. № 2 (53). С. 28–42.

17. Использование пеленгатора радиомаяков на беспилотном летательном аппарате в поисково-спасательных операциях / М. Ю. Алемпьев, А. Е. Семенова, Д. С. Коптев [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 4. С. 129–145. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-129-145>

References

1. Kuznetsova I.A., Gilyazov M.R. The influence of the flight altitude of an unmanned aerial vehicle in data processing in automated software. *Nauchno-obrazovatel'nyi zhurnal dlya studentov i prepodavatelei «StudNet» = Scientific and Educational Journal for Students and Teachers «StudNet»*. 2021;(5). (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-vysoty-poleta-bespilotnogo-letalnogo-apparata-pri-obrabotke-dannyh-v-avtomatizirovannyh-programmnyh-obespecheniyah> (accessed 10.09.2025).
2. Skrypnikov A.V., Denisenko V. V., Evteeva K.S. Data protection during transmission over wireless communication channels. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk = International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2019;(8-2):35–38. (In Russ.)
3. Parinov M.V., Vetokhin V.V., Fedorov S.M. Analysis of the possibilities and methods of modernization of control, navigation and communication systems of unmanned aerial vehicles for industrial purposes using the example of DJI products. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2023;(6):147–155. (In Russ.)
4. Bulatova A.R. Quantum cryptography and quantum computing. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Penza State University*. 2025;(1):11–14. (In Russ.)
5. Bukashkin S.A., Cherepnev M.A. Quantum devices in cryptography. *International Journal of Open Information Technologies*. 2023;11(1):104–108. (In Russ.)
6. Vydrin D.F., Situdikov D.R. Basic parameters of the LoRaWAN wireless technology. *Academy*. 2019;(2):22–24. (In Russ.)
7. Murtazin M. M. Data security of the LORAWAN energy efficient network. *Elektronnaya nauka = Electronic Science*. 2022;(2):2–8. (In Russ.)
8. Oleinikova A.V., Surudin D.S., Shafeev D.E. Quantum computers: hopes and reality. *Perspektivy razvitiya informatsionnykh tekhnologii = Prospects for the Development of Information Technology*. 2016;(30):145–153. (In Russ.)
9. Dovgal V.A. Integration of networks and computing for building a drone swarm control system as a network management system. *Vestnik Adygeiskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Adygea State University. Series 4: Natural, Mathematical and Technical Sciences*. 2022;(1):62–76. (In Russ.)

10. Dovgal V.A., Osmani K.A. Development of a system for extending the range of an unmanned aerial vehicle using LORA wireless communication technology. *Vestnik Adygeiskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Adygea State University. Series 4: Natural, Mathematical and Technical sciences.* 2022;(3):69–76. (In Russ.)
11. Murtazin M.M. Data security of the LORAWAN energy efficient network. *Electronic Science.* 2022;(2):2–8. (In Russ.)
12. Serikova Yu.I., Malygina E.A. Vulnerabilities of cryptographic systems with various protocols of quantum key distribution and the key role of biometrics in quantum cryptography. *Universum: tekhnicheskie nauki = Universum: Technical Sciences.* 2017;(11):13–15. (In Russ.)
13. Oleinikova A.V., Surudin D.S., Shafeev D.E. Quantum computers: hopes and reality. *Perspektivy razvitiya informatsionnykh tekhnologii = Prospects for the Development of Information Technology.* 2016;(30):145–153. (In Russ.)
14. Alempyev M.Yu., Semenova A.E., Koptev D.S., Dovbnya V.G. Assessing the feasibility of using a radio communication channel to transmit video information between an unmanned underwater vehicle and a remote control. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(1):64–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-64-78>
15. Alempyev M.Yu., Semenova A.E., Koptev D.S., Dovbnya V.G. Estimating the flight range and video transmission performance of an unmanned aerial vehicle (UAV) for emergencies monitored in complex meteorological conditions. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2024;14(2):21–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-21-39>
16. Leushin A.V. LoRa as a new type of modulation. Operating principle, basic parameters, noise immunity. *Tekhnika radiosvyazi = Radio Communication Technology.* 2022;(2):28–42. (In Russ.)
17. Alempyev M.Yu., Semenova A.E., Koptev D.S., et al. Using a radio beacon direction finder on an unmanned aerial vehicle in search and rescue operations. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2024;4(4):129–145. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-129-145>

Информация об авторах / Information about the Authors

Алемпьев Михаил Юрьевич, аспирант кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mihail.alempiev@mail.ru, ORCID: 0009-0009-6412-7899

Коптев Дмитрий Сергеевич, старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: d.s.koptev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7759-579X

Довбня Виталий Георгиевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vit_georg@mail.ru

Ревякина Мария Олеговна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории молекулярной, трансляционной и цифровой кардиоиммунологии, Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, г. Орёл, Российская Федерация, e-mail: revyakina_masha@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1593-5290

Mikhail Y. Alempiev, Postgraduate at the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mihail.alempiev@mail.ru, ORCID: 0009-0009-6412-7899

Dmitry S. Koptev, Senior Lecturer of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: d.s.koptev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7759-579X

Vitaly G. Dovbnya, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vit_georg@mail.ru

Maria O. Revyakina, Candidate of Sciences (Engineering), Leading Researcher at the Laboratory of Molecular, Translational and Digital Cardioimmunology, Orel State University named after I. S. Turgenev, Orel, Russian Federation, e-mail: revyakina_masha@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1593-5290

РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-123-136>



УДК 004.93, 004.896

Структурный синтез нейросетевых моделей биометрического распознавания в пространстве вторичных признаков многомерных динамических кривых

Е. А. Данилов¹✉, А. Х. Танцеров¹

¹ Пензенский государственный технологический университет
пр. Байдукова / ул. Гагарина, д. 1а / 11, г. Пенза 440039, Российская Федерация

✉ e-mail: danilov@penzgtu.ru

Резюме

Цель исследования. Целью работы является повышение достоверности биометрической идентификации пользователя по динамической подписи за счёт построения нейросетевых моделей, ориентированных на работу в пространстве вторичных признаков, полученных из многомерных динамических кривых. В центре внимания – структурный и параметрический синтез архитектуры классифицирующей нейронной сети на основе анализа статистических, гармонических и вейвлет-преобразованных характеристик динамической подписи.

Методы. Предлагается модель идентификации, реализующая параллельное распознавание многомерных фрагментов кривой различными методами – статистическими, метрическими и нейросетевыми. Исследование опирается на выборку параметров динамической подписи, включая координаты, давление, скорость, ускорение и производные от них признаки. Используются математические ожидания, дисперсии, коэффициенты вариации, энтропии и эквивокации, а также ДПФ-, ДКП- и ДВП-преобразования для формирования информативного признакового пространства. На основе этих признаков проводится синтез MLP-классификатора с адаптацией его структуры под входные данные.

Результаты. Экспериментально подтверждена возможность повышения достоверности идентификации пользователя при использовании вторичных признаков по сравнению с традиционными подходами. Использование 3–5 ключевых параметров и их спектральных признаков обеспечивает точность идентификации на уровне 0,8–0,95 в условиях ограниченного количества пользователей и удерживает её около 0,7 при масштабировании. Средний прирост точности составил 25–35% по сравнению со статистическими алгоритмами и 5–15% по сравнению с метрическими.

Заключение. Для достижения заданных показателей достоверности рекомендуется использовать многоуровневый подход к идентификации, предполагающий раздельную обработку параметров динамической подписи с последующим комплексированием результатов. Наиболее эффективными оказались нейросетевые модели в сочетании с метрическими и корреляционными методами в пространстве спектральных и статистических признаков.

© Данилов Е. А., Танцеров А. Х., 2025

Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2025;15(4):123–136

Ключевые слова: динамическая подпись; вторичные признаки; нейросетевая идентификация; дискретные преобразования; спектральный анализ; вейвлет-преобразование; многомерные криевые.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Данилов Е. А., Танцеров А. Х. Структурный синтез нейросетевых моделей биометрического распознавания в пространстве вторичных признаков многомерных динамических кривых // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 4. С. 123–136. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-123-136>

Поступила в редакцию 06.10.2025

Подписана в печать 05.11.2025

Опубликована 26.12.2025

Structural synthesis of neural network models for biometric recognition in the feature space of multidimensional dynamic curves

Evgeny A. Danilov¹✉, Alexander K. Tantserov¹

¹ Penza State Technological Institute

1a/11 Baidukova Pass. / Gagarina Str., Penza 440039, Russian Federation

✉ e-mail: danilov@penzgtu.ru

Abstract

Purpose of research. The study aims to improve the reliability of biometric user identification based on dynamic signatures by developing neural network models operating in the feature space of multidimensional dynamic curves. The focus is on the structural and parametric synthesis of a classification neural network architecture using statistical, harmonic, and wavelet-transformed features extracted from the dynamic signature.

Methods. The proposed identification model performs parallel recognition of multidimensional curve fragments using various methods, including statistical, metric, and neural classifiers. The analysis is based on a set of dynamic signature parameters, such as pen coordinates, pressure, velocity, acceleration, and their derived features. Statistical metrics – mean values, standard deviations, coefficients of variation, entropy, and equivocation – are combined with Discrete Fourier Transform (DFT), Discrete Cosine Transform (DCT), and Discrete Wavelet Transform (DWT) to form an informative feature space. These features are then used to synthesize an MLP classifier whose architecture is adapted to the input data.

Results. Experimental results confirm that using secondary features significantly increases identification accuracy compared to traditional methods. A set of 3–5 key parameters along with their spectral derivatives allows for accuracy levels of 0,8 to 0,95 with a limited number of users, maintaining around 0,7 when scaling. The average improvement in identification accuracy was 25–35% over statistical methods and 5–15% over metric-based algorithms.

Conclusion. To ensure the required level of identification reliability, it is recommended to apply a multi-level approach involving separate processing of dynamic signature parameters followed by result integration. The most effective configurations were based on neural network models combined with metric and correlation methods operating in the space of spectral and statistical features.

Keywords: dynamic signature; secondary features; neural identification; discrete transforms; spectral analysis; wavelet transform; multidimensional curves.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Danilov E.A., Tantserov A.K. Structural synthesis of neural network models for biometric recognition in the feature space of multidimensional dynamic curves. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(4):123–136. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-123-136>

Received 06.10.2025

Accepted 05.11.2025

Published 26.12.2025

Введение

Динамическая подпись как способ биометрической идентификации получила широкое распространение благодаря высокой степени индивидуальности и сложности подделки [1]. В отличие от статической подписи она содержит богатую поведенческую информацию, такую как давление, скорость, ускорение и временные характеристики, что делает её перспективным инструментом в системах информационной безопасности [2]. Однако надёжность распознавания динамической подписи остаётся критически важной задачей из-за высокой вариативности поведения пользователя и влияния внешних факторов. Современные методы идентификации всё чаще используют не только первичные данные кривых, но и вторичные признаки – статистические, спектральные и комбинированные характеристики, извлекаемые из сигналов [3]. Это позволяет перейти от прямого сопоставления временных рядов к работе в более устойчивом и информативном признаковом пространстве. В данной работе рассматривается подход, основанный на формировании таких вторичных признаков и их использовании в структуре многослойной нейронной сети (MLP) для распознавания. Он заключается в разработке структурно-адаптивных нейросетевых моделей, обеспечивающих высокую достоверность идентификации по параметрам многомерных динамических

кривых, полученных при регистрации подписи пользователя [4]. Работа направлена на сравнение эффективности классификации с использованием нейросетевых методов и традиционных алгоритмов обнаружения различий многомерных сигналов, таких как байесовские, минимаксные и корреляционные подходы.

Материалы и методы

Исходными данными в рамках исследования служили временные ряды параметров, полученных при регистрации динамической подписи: координаты пера по осям X и Y, давление на экран, скорости и ускорения вдоль трёх пространственных осей. Эти параметры представляют собой многомерные кривые, каждое измерение которых соответствует одной из характеристик сигнала.

Для повышения информативности и устойчивости распознавания использовалось построение вторичных признаков. В контексте биометрической идентификации на основе динамической подписи под вторичными признаками многомерных траекторий понимается совокупность характеристик, полученных в результате предварительной обработки исходных сигналов [5]. К таким признакам относятся различные статистические параметры (средние значения, дисперсии, энтропии и др.), а также спектральные компоненты, извлекаемые с помощью преобразований Фурье,

косинусного и вейвлет-анализа [6]. Полученные векторы признаков далее используются в качестве входных данных для нейросетевых моделей классификации, в частности, многослойных персепtronов (MLP) и сетей с обратным распространением ошибки (BProp).

Решение задачи классификации в данной постановке можно интерпретировать как формализованную статистическую игру между двумя сторонами: системой распознавания (условный игрок А) и множеством возможных объектов (игрок В). Каждая сторона действует в рамках определённой стратегии, а сама игра описывается через структуру, задающую вероятности, выигрыши и риски. Основная цель системы распознавания – свести к минимуму вероятный риск ошибочной идентификации, для чего и подбирается соответствующая стратегия принятия решений [7]. В зависимости от доступной априорной информации и характера функции потерь применяются разные подходы: байесовский, минимаксный или стратегия Неймана – Пирсона.

Важно отметить, что при ряде допущений (например, симметрии распределений и равновероятности классов) перечисленные стратегии приводят к одинаковым решающим правилам, различаясь лишь в способах определения порогов принятия решений.

Если наблюдения организованы в виде непрерывной последовательности измерений динамической подписи, то идентификация может опираться не только на анализ каждой индивидуальной кривой, но и на агрегированные признаки, полученные из совокупности кривых. Такой подход позволяет выявлять изменения принадлежности подписи на

основе широкой палитры статистических характеристик, тем самым повышая надёжность последующей классификации [8].

Тогда распознавание осуществляется в квазиреальном масштабе времени (необходим интервал времени на получении всех кривых и расчет их статистических характеристик). На вход НС поступают:

1) математическое ожидание m_x каждой кривой:

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad e_{mx} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (1)$$

где n – количество отсчетов измеряемого параметра динамической подписи; σ – среднеквадратическое отклонение измеряемого параметра динамической подписи;

2) среднеквадратическое отклонение σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}, \quad e_{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{2n}}; \quad (2)$$

3) коэффициент вариации и его ошибка e_9 :

$$\vartheta = \frac{\sigma}{m_x} \cdot 100\%, \quad e_9 = \vartheta \sqrt{\frac{0,5 + 0,0001\vartheta^2}{n}}; \quad (3)$$

4) средняя разность Джинни:

$$g = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n |x_i - x_j|, \quad (4)$$

5) удельная энтропия кривой:

$$H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k a_i \log_2 a_i, \quad k = 3,32 \lg n + 1 = 1,44 \ln n + 1, \quad (5)$$

где n – число отсчетов измеряемого параметра динамической подписи;

6) показатель точности регистрации кривой:

$$p = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N \left(\frac{e_{s \text{ mx}}}{m_{s x}} 100\% \right), \quad (6)$$

$$e_p = p \sqrt{\frac{1}{2n} + \left(\frac{p}{100} \right)^2},$$

где N – количество измеряемых параметров динамической подписи; s – индекс измеряемого параметра динамической подписи; $m_{s x}$ – математическое ожидание s -го измеряемого параметра динамической подписи; $e_{s \text{ mx}}$ – ошибка математического ожидания s -го измеряемого параметра динамической подписи.

7) параметр эквивокации между двумя реализациями № 1 (состояние покоя пользователя) и № 2 (идентифицируемое) постановки подписи, вычисляемый как

$$D = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N |I_s^1 - I_s^2|, \quad (7)$$

где N – количество измеряемых параметров динамической подписи; I_s^1 – избыточность первой реализации многомерной кривой; I_s^2 – избыточность второй реализации многомерной кривой,

Показатель эквивокации отражает степень структурных изменений, происходящих в процессе выполнения подписи в пространстве признаков, поддающихся измерению. Данный параметр позволяет количественно оценить различие между двумя реализациями одного и того же биометрического действия (например, подписи), выполненного пользователем в идентичных условиях.

Для вычисления эквивокации формируются два вектора статистических характеристик, соответствующие различным временным отрезкам – первому и второму интервалу регистрации сигнала. Эти векторы содержат числовые описания динамики подписи и включают такие параметры, как математическое ожидание, дисперсия, энтропия и прочее. Сравнение указанных векторов позволяет выявить латентные изменения в структуре поведения, даже несмотря на то, что пользователь формально находился в одном и том же функциональном состоянии в обоих интервалах. Таким образом, эквивокация служит чувствительным индикатором внутренней вариативности моторных характеристик при выполнении подписи [9].

В дополнение к статистике применялись спектральные методы анализа: дискретное преобразование Фурье, дискретное косинусное преобразование и дискретное вейвлет-преобразование. Целью было выявление устойчивых частотных компонентов и локальных изменений сигнала, отражающих индивидуальные особенности пользователя. Результаты преобразований представлялись в виде коэффициентов, служащих входными параметрами для обучения нейросети [10]. Параллельно нейросетевому подходу проводилось сравнение с традиционными стратегиями классификации: байесовской, минимаксной и методом корреляции [11]. Это позволило оценить эффективность предложенной модели на фоне классических методов.

Результаты и их обсуждение

В качестве рабочей гипотезы рассматривалась идея о том, что при переводе анализируемых данных из амплитудной в частотную область могут проявиться характерные признаки или

устойчивые взаимосвязи параметров, которые могут быть использованы в качестве показателей для выработки критериев – базовых элементов разрабатываемых классификаторов.

Основные преобразования исходных данных реализованы на базе

дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [12]. На рисунке 1 и 2 приведены графики положительных значений результатов ДПФ кривых, полученные для параметров: площадь пятна нажатия на экран при постановке подписи пальцем, а не стилусом, и ускорение по оси Z.

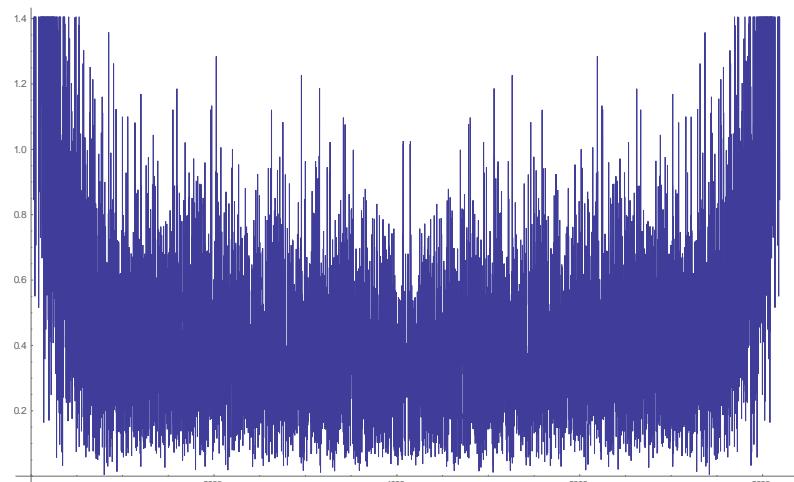


Рис. 1. Результаты ДПФ для параметра «площадь пятна нажатия на экран»

Fig. 1. DFT results for the "touch area on the screen" parameter

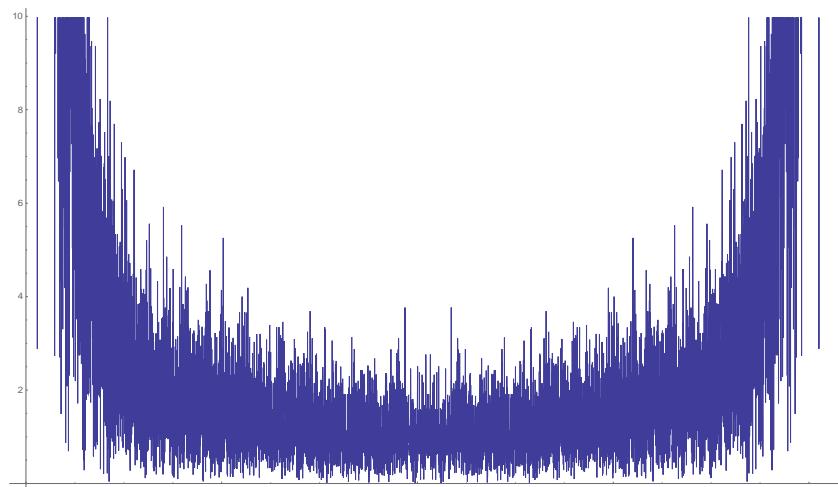


Рис. 2. Результаты ДПФ для параметра «ускорение по оси Z»

Fig. 2. DFT results for the "Z-axis acceleration" parameter

Анализ преобразованных параметров по Фурье (включая не представленные на графиках координаты по оси X, координаты по оси Y, давление на экран, скорость по оси X, скорость по оси Y, ускорение по оси X, ускорение

по оси Y), показал нестабильные (от выборки к выборке) результаты. Аналогичная ситуация наблюдалась при проведении дискретного косинус-преобразования (ДКП) в соответствии с выражениями:

$$\text{ДКП-I: } \sqrt{\frac{2}{n-1}} \left(\frac{u_1}{2} + \sum_{r=2}^{n-1} u_r \cos \left(\frac{\pi}{n-1} (r-1)(s-1) \right) + (-1)^{s-1} \frac{u_n}{2} \right), \quad (8)$$

$$\text{ДКП-II: } \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{r=1}^n u_r \cos \left(\frac{\pi}{n} \left(r - \frac{1}{2} \right) (s-1) \right), \quad (9)$$

$$\text{ДКП-III: } \frac{1}{\sqrt{n}} \left(u_1 + 2 \sum_{r=2}^n u_r \cos \left(\frac{\pi}{n} (r-1) \left(s - \frac{1}{2} \right) \right) \right), \quad (10)$$

$$\text{ДКП-IV: } \sqrt{\frac{2}{n}} \left(\sum_{r=1}^n u_r \cos \left(\frac{\pi}{n} \left(r - \frac{1}{2} \right) \left(s - \frac{1}{2} \right) \right) \right). \quad (11)$$

На рисунке 3 и 4 приведены графики положительных значений результатов

ДКП четырех типов, полученные для параметра «давление».

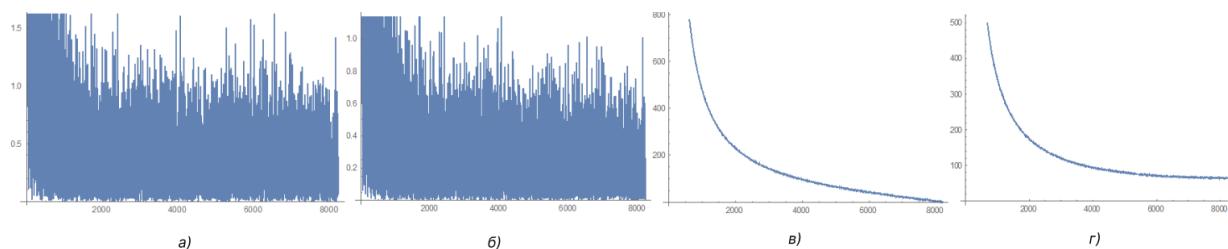


Рис. 3. Результаты дискретного косинусного преобразования одной кривой подписи:
а – FourierDCT+1; б – FourierDCT+2; в – FourierDCT+3; г – FourierDCT+4

Fig. 3. Results of the discrete cosine transform of a single signature curve:
а – FourierDCT+1; б – FourierDCT+2; в – FourierDCT+3; г – FourierDCT+4

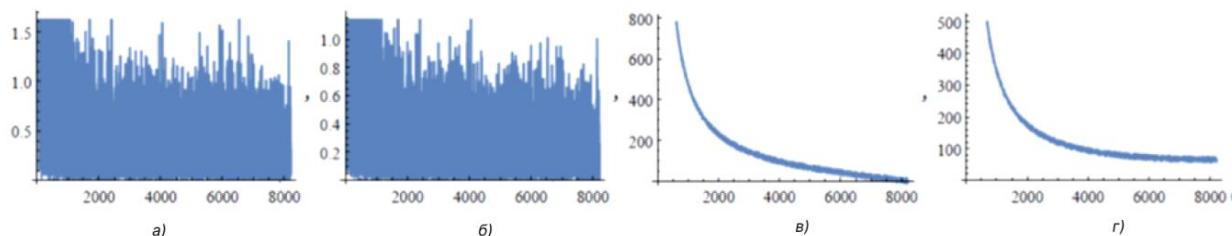


Рис. 4. Результаты дискретного синусного преобразования одной кривой подписи:
а – FourierDCT+1; б – FourierDCT+2; в – FourierDCT+3; г – FourierDCT+4

Fig. 4. Results of the discrete sine transform of a single signature curve:
а – FourierDCT+1; б – FourierDCT+2; в – FourierDCT+3; г – FourierDCT+4

Коэффициенты гармонических преобразований, так же как и статистические моменты, показали статистическую

устойчивость при разделении пространства признаков на классы аутентифицируемых пользователей¹.

¹ Пат. 2553094 Российская Федерация, МПК G06K 9/62, G06T. Способ идентификации личности по рукописному тексту /

Добрица В. П., Милых В. А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ЮЗГУ. № 2014120101/08; заявл. 20.05.2014; опубл. 10.06.2015, Бюл. № 16. 11 с.

Таким образом, проведение частотного анализа с целью выявления характерных признаков анализируемого сигнала представляется целесообразным.

К предмету гармонического анализа относятся все разновидности временно-частотного представления, элементами которых являются, в том числе, и вейвлет-преобразования [13].

Принимая во внимание дискретный характер обрабатываемого сигнала, по отношению к нему проверялся аппарат

дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) [14]:

$$y[n] = (x \cdot g)[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]g[n-k]. \quad (12)$$

В результате получаются детализирующие коэффициенты и коэффициенты аппроксимации, которые в качестве вторичных признаков подавались на НС [15]. Описанное преобразование поясняет схема, представленная ниже (рис. 5).



Рис. 5. Схема разложения кривой подписи в ДВП

Fig. 5. Diagram of signature curve decomposition into DWT components

Путем отбрасывания ряда коэффициентов (детализирующих или, напротив, аппроксимирующих) имеется возможность реализовать низко- или высокочастотную фильтрацию входного сигнала [16].

Предположительно, что данные преобразования, будучи разновидностью временно-частотного представления, должны позволить локализовать искомый фрагмент сигнала на временной оси, что в конечном счете позволит решить задачу распознавания и классификации образцов подписи.

Применительно к классу решаемых задач наиболее эффективными являются вейвлет-сглаживание, удаление шума и компрессия сигналов при выборе оптимального базиса и при изменяемом пороге удаления части вейвлет-коэффициентов.

В дальнейшем вейвлет-коэффициенты или статистические признаки кривых подаются на вход НС для последующей классификации подписи.

Протокол наблюдений Ω_1 прецедентов вида (13) представляет собой матрицу обучающей выборки вида «объект-признак»:

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} k_1^1 & \dots & k_{L_k}^1 & v_1^1 & \dots & v_{L_v}^1 & y_1^1 & \dots & y_m^1 & p_1^1 & \dots & p_{L_p}^1 & z_1^1 & \dots & z_{L_z}^1 & q_1^1 & \dots & q_N^1 \\ \dots & \dots \\ k_1^i & \dots & k_{L_k}^i & v_1^i & \dots & v_{L_v}^i & y_1^i & \dots & y_m^i & p_1^i & \dots & p_{L_p}^i & z_1^i & \dots & z_{L_z}^i & q_1^i & \dots & q_N^i \\ \dots & \dots \\ k_1^L & \dots & k_{L_k}^L & v_1^L & \dots & v_{L_v}^L & y_1^L & \dots & y_m^L & p_1^L & \dots & p_{L_p}^L & z_1^L & \dots & z_{L_z}^L & q_1^L & \dots & q_N^L \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где $(n + L_z + N)$ – размер параметрического описания каждого прецедента; L – количество строк матрицы, характеризует объем обучающей выборки.

Каждый из векторов $\{Z^i\}_{i=1}^L$, зафиксированный в момент времени t_i , $i = \overline{1, L}$, содержит параметрическое описание кривых подписи в виде

$$Z^i = (z_1^i, z_2^i, \dots, z_j^i, \dots, z_{L_z}^i), \quad (14)$$

$$i = \overline{1, L}, j = \overline{1, L_z},$$

где z_j^i – j -й параметр описания подписи, определенный в i -й момент времени; L_z – общее количество признакового пространства описания подписи.

На этапе синтеза модели распознавания вида подписи (т. е. ее принадлежность) вектор $\{Z^i\}_{i=1}^L$ является выходным для отображения $\Psi_1: \{X\} \rightarrow \{Z\}$ и входным для отображения $\Psi_2: \{P, Z\} \rightarrow \{Q\}$.

Этап формирования протокола матрицы Ω_1 завершается предобработкой значений матрицы (13). Как входами, так и выходами модели распознавания вида подписи могут быть совершенно разнородные величины. Результаты синтеза и использования модели не должны зависеть от единиц измерения этих величин.

Основной операцией предварительной обработки является приведение значений $\{X^i\}_{i=1}^L$ к единичному масштабу, что обеспечивается нормировкой каждой j -й переменной $x_1^i, x_2^i, \dots, x_p^i, \dots, x_n^i$,

$p = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, L}$ на диапазон разброса ее значений по всем отсчетам $i = \overline{1, L}$.

Этап структурного синтеза модели распознавания заключается в определении количества слоев MLP-классификатора, числа рабочих и избыточных нейронов в каждом слое, задания вида функции активации в каждом слое, количества избыточных нелинейных преобразователей в каждом слое [17]. Основной принцип использования модели на основе MLP-классификатора состоит в неизменности форматов данных, используемых для параметрического синтеза и данных, на основе которых осуществляется распознавание вида подписи [18].

Так как модель реализует два отображения: $\Psi_1: \{X\} \rightarrow \{Z\}$ и $\Psi_2: \{P, Z\} \rightarrow \{Q\}$, рассмотрим структуру нейроклассификатора каждого из них.

На рисунке 6 представлена схема подачи компонент обучающих векторов, образующих строки матриц. Распознаваемые параметры находятся в крайних (справа) столбцах обучающей выборки.

Для отображения $\Psi_1: \{X\} \rightarrow \{Z\}$ $N_2 = (n + L_z)$, для отображения $\Psi_2: \{P, Z\} \rightarrow \{Q\}$ $N_2 = (N + L_p + L_z)$.

Таким образом, определённая структура MLP-классификатора для отображений $\Psi_1: \{X\} \rightarrow \{Z\}$, $\Psi_2: \{P, Z\} \rightarrow \{Q\}$ и сформированные по данным протокола Ω_1 обучающие выборки позволяют перейти к параметрическому синтезу модели распознавания вида подписи и ее принадлежности [19].

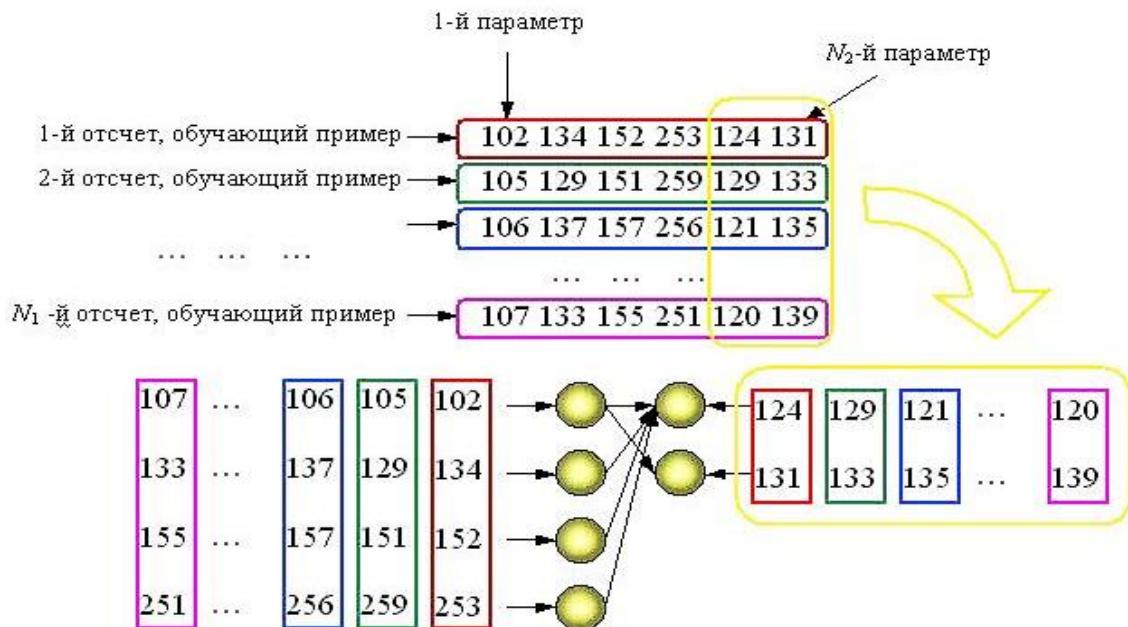


Рис. 6. Структура «Вход-выход» для обучающих векторов НС идентификации фрагмента многомерной кривой

Fig. 6. Input-output structure for identification training vectors HC fragment of a multidimensional curve

Результаты показывают, что использование структурно-адаптивной нейросетевой архитектуры в пространстве вторичных признаков позволяет достигать высокой точности идентификации, устойчивой к вариативности поведения пользователей и шумам входных данных. Объединение статистических и спектральных признаков создаёт основу для построения надёжных биометрических систем.

Выводы

Выполненное исследование подтвердило эффективность применения нейросетевых моделей, структурно адаптированных под пространство вторичных признаков, в задаче биометрической идентификации по динамической подписи. Использование статистических, гармонических и вейвлет-преобразованных характеристик позволило существенно повысить точность и

устойчивость идентификации даже в условиях неопределённости и масштабирования пользовательской базы.

Наиболее информативными оказались признаки, полученные после вейвлет-преобразования и интеграции со статистическими характеристиками. Такая комбинация позволила обеспечить прирост точности до 35% по сравнению с классическими статистическими методами и улучшение результатов на 5–15% по сравнению с метрическими подходами. Показано, что нейросетевой классификатор на основе архитектуры MLP способен эффективно заменять традиционные схемы принятия решений, особенно при наличии шумов, нестабильного поведения пользователей и ограниченной априорной информации. Сравнение с байесовской стратегией показало, что при наличии априорных вероятностей классов различие в результатах минимально. Однако в условиях

неопределенности минимаксная стратегия уступала MLP-модели как по точности, так и по способности к адаптации. Наибольшее преимущество нейросетевой архитектуры проявилось в условиях, когда пользовательские данные демонстрировали значительные вариации. Визуализация результатов, полученных с помощью преобразований, подтверждает наличие устойчивых признаков в частотной области для каждого пользователя. Это особенно выражено в области низкочастотных коэффициентов ДКП и аппроксимационных коэффициентов ДВП. Эти признаки обладают потенциальной

дискретной инвариантностью и могут быть полезны при построении обобщающих идентификаторов.

Разработанный синтез нейросетевых моделей биометрического распознавания может быть применен для построения гибких систем аутентификации в реальном времени и адаптирован под иные биометрические каналы, где возможно формирование вторичных признаков. В дальнейшем планируется исследование влияния различных стратегий ансамблирования и интеграции дополнительных сенсорных каналов в общую систему идентификации.

Список литературы

1. Ломов Н., Петрова Д., Рязанцева Ю. Биометрия в финансовой сфере 2020: Выгоды для потребителя. URL: <https://www.fintechru.org/analytics/analiticheskaya-zapiska-po-biometrii/?ysclid=lvwb2xh8z610856013> (дата обращения: 08.09.2025).
2. Отчет об анализе размера, доли и тенденций мирового рынка биометрических систем – обзор отрасли и прогноз до 2032 года // Data Bridge. URL: <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-biometric-system-market?ysclid=lvwg0cfco7989485412> (дата обращения: 08.09.2025).
3. Танцеров А. Х., Данилов Е. А. Современные подходы к распознаванию и аутентификации подписей: методы обработки изображений // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2025. Т. 14, № 2 (70). С. 71–76. EDN SCSZTT
4. Advances in Computer Vision and Pattern Recognition / S. Marcel, M. S. Nixon, J. Fierrez, N. Evans. Springer, 2023. 522 р.
5. Старовойтов В. В., Ахунджанов У. Ю. Распределение значений локальной кривизны как структурный признак для off-line верификации рукописной подписи // Системный анализ и прикладная информатика. 2023. № 2. С. 49–58.
6. Танцеров А. Х., Данилов Е. А., Мартышкин А. И. Обзор и сравнение некоторых методов аутентификации подписи по динамическим параметрам // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 92. С. 213–224. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2025-92-213-224>
7. Carmona P. L., Salvador S. A., Fred L. N. Mathematical Methodologies in Pattern Recognition and Machine Learning: Contributions from the International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods. Springer, 2022. 204 р.
8. Иванов А. И. Использование обратного критерия хи-квадрат Пирсона при мультиплективном синтезе новых статистических критериев из уже известных критериев для проверки гипотезы нормального распределения данных малых выборок // Известия

высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 2 (66). С. 15–23. EDN LPXYSF

9. Иванов А. И. Синтез новых интегро-дифференциальных статистических критериев и эквивалентных им искусственных нейронов для малых выборок. Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2022. С. 161–163. EDN JHGXB1

10. Танцеров А. Х., Данилов Е. А. Кинематическая модель формирования эталонных динамических параметров подписи пользователя // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 92. С. 170–178. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2025-92-170-178>

11. Jain A. K., Griess F. D., Connell S. D. Online signature verification // Pattern Recognition. 2022. N 35. P. 2963–2972.

12. Wijdan Yassen A. AlKarem, Khawla H. Ali, Eman Thabet Khalid. Handwritten Signature Verification Method Using Convolutional Neural Network // Iraqi Journal for Electrical And Electronic Engineering. 2024. N 20 (2). P. 77–84. <https://doi.org/10.37917/ijeee.20.2.7>

13. DeepSign: Deep learning for signature analysis / R. Tolosana, R. Vera-Rodriguez, J. Fierrez, J. Ortega-Garcia // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 2020. N 15(1). P. 229–240. <https://doi.org/10.1109/TBIOM.2021.3054533>

14. Off-line handwritten signature GPDS-960 corpus / J. F. Vargas, M. A. Ferrer, C. M. Travieso, J. B. Alonso // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 2017. N 12(3). P. 596–605. <https://doi.org/10.1109/ICDAR.2007.4377018>

15. Learning hierarchical features for scene labeling / C. Farabet, C. Couprie, L. Najman, Y. LeCun // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 2023. N 8 (35). P. 1915–1929.

16. Batista L., Granger E., Sabourin R. Dynamic selection of generative – discriminative ensembles for off-line signature verification // Pattern Recognition. 2016. N 52. P. 182–197. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2011.10.011>

17. Ахунджанов У. Ю., Старовойтов В. В. Предварительная обработка изображений рукописных подписей для последующего распознавания // Системный анализ и прикладная информатика. 2022. № 2. С. 4–9.

18. Иванов А. И., Куприянов Е. Н. Синтез новых более мощных статистических критериев через мультиплективное объединение классических критериев Фроцини и Мурота – Такеучи с критерием Херста для проверки гипотезы нормальности малых выборок // Надежность. 2022. Т. 22, № 1. С. 52–55. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-1-52-55>. EDN CWHSKS

19. Вдовкина С. А., Шибанов С. В. Библиотека для онлайн-верификации рукописной подписи // Вестник Пензенского государственного университета. 2022. № 2. С. 76–84.

References

1. Lomov N., Petrova D., Ryazantseva Yu. Biometrics in the financial sector 2020: Benefits for the consumer. Available at: <https://www.fintechru.org/analytics/analiticheskaya-zapiska-po-biometrii/?ysclid=lvwb2xh8z610856013> (accessed 08.09.2025).

2. Report on the analysis of the size, share and trends of the global biometric systems market – an overview of the industry and forecast up to 2032 // Data Bridge. (In Russ.) Available at: <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-biometric-system-market?ysclid=1vvg0cfco7989485412> (accessed: 08.09.2025).
3. Dancers A.Kh., Danilov E.A. Modern approaches to the recognition and authentication of signatures: methods of image processing. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plus = XXI Century: Results of the Past and Problems of the Present Plus.* 2025;14(2):71–76. (In Russ.) EDN SCSZTT
4. Marcel S., Nixon M.S., Fierrez J., Evans N. Advances in Computer Vision and Pattern Recognition. Springer; 2023. 522 p.
5. Starovoitov V.V., Akhundzhanov U.Yu. Distribution of local curve values as a structural feature for off-line verification of a handwritten signature. *Sistemnyi analiz i prikladnaya informatika = System Analysis and Applied Informatics.* 2023;(2):49–58. (In Russ.)
6. Dancers A.Kh., Danilov E.A., Martyshkin A.I. Review and comparison of some methods of signature authentication by dynamic parameters. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University.* 2025;(92):213–224. (In Russ.) <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2025-92-213-224>
7. Carmona P.L., Salvador S.A., Fred L.N. Mathematical Methodologies in Pattern Recognition and Machine Learning: Contributions from the International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods. Springer; 2022. 204 p.
8. Ivanov A.I. Using the inverse chi-square Pearson criterion in the multi-plicative synthesis of new statistical criteria from already known criteria to test the hypothesis of the normal distribution of these small samples. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Higher Educational Institutions. Volga region. Technical Sciences.* 2023;(2):15–23. (In Russ.) EDN LPXYSF
9. Ivanov A.I. Synthesis of new integro-differential statistical criteria and their equivalent artificial neurons for small samples. Samara: Izdatel'stvo Samarskogo nauchnogo tsentra RAN; 2022. P. 161–163. (In Russ.) EDN JHGXB1
10. Dancers A.Kh., Danilov E.A. Kinematic model of the formation of reference dynamic parameters of the user's signature. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University.* 2025;(92):170–178. (In Russ.) <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2025-92-170-178>
11. Jain A. K., Griess F.D., Connell S.D. Online signature verification. *Pattern Recognition.* 2022;(35):2963–2972.
12. Wijdan Yassen A. AlKarem, Khawla H. Ali, Eman Thabet Khalid. Handwritten Signature Verification Method Using Convolutional Neural Network. *Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering.* 2024;(20):77–84. <https://doi.org/10.37917/ijeee.20.2.7>
13. Tolosana R., Vera-Rodriguez R., Fierrez J., Ortega-Garcia J. DeepSign: Deep learning for signature analysis. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security.* 2020;(15):229–240. <https://doi.org/10.1109/TBIOM.2021.3054533>
14. Vargas J.F., Ferrer M.A., Travieso C.M., Alonso J.B. Off-line handwritten signature GPDS-960 corpus. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security.* 2017;(12):596–605. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2017.27477018>

15. Farabet C., Couprie C., Najman L., LeCun Y. Learning hierarchical features for scene labeling. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2023;(8):1915–1929.
16. Batista L., Granger E., Sabourin R. Dynamic selection of generative – discriminative en-sembles for off-line signature verification. *Pattern Recognition*. 2016;(52):182–197. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2011.10.011>
17. Akhundzhanov U.Yu., Starovoitov V.V. Preliminary processing of images of hand-written signatures for subsequent recognition. *Sistemnyi analiz i prikladnaya informatika = System Analysis and Stock Informatics*. 2022;(2):4–9. (In Russ.)
18. Ivanov A.I., Kupriyanov E.N. Synthesis of new more powerful statistical Cree-Terii through the multiplicative union of the classical Frozini and Murota – Takeuchi criteria with the Hirst criterion to test the hypothesis of the normality of small samples. *Nadezhnost' = Reliability*. 2022;22(1):52–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-1-52-55>. EDN CWHSKS
19. Vdovkina S.A., Shibanov S.V. Library for online verification of handwritten signatures. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Penza State University*. 2022;(2):76–84. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Данилов Евгений Александрович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры программирования, Пензенский
государственный технологический институт,
г. Пенза, Российская Федерация,
e-mail: danilov@penzgtu.ru,
Researcher ID: OUI-0415-2025,
ORCID: 0000-0003-4114-7036

Evgeny A. Danilov, Candidate of Sciences
(Engineering), Associate Professor
at the Department of Programming,
Penza State Technological Institute,
Penza, Russian Federation,
e-mail: danilov@penzgtu.ru,
Researcher ID: OUI-0415-2025,
ORCID: 0000-0003-4114-7036

Танцеров Александр Хабибуллоевич,
аспирант кафедры программирования,
Пензенский государственный технологический
институт, г. Пенза, Российская Федерация,
e-mail: alex.tancerov@mail.ru,
Researcher ID: O-0537-2025,
ORCID: 0009-0006-7695-0514

Alexander K. Tancerov, Postgraduate
at the Department of Programming,
Penza State Technological Institute,
Penza, Russian Federation,
e-mail: alex.tancerov@mail.ru,
Researcher ID: O-0537-2025,
ORCID: 0000-0003-4114-7036

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-137-149>

УДК 611.986

Методика интегративной анатомической оценки стопы

Л. М. Смирнова^{1,2}, В. В. Михайлишин¹

¹ Федеральный научно-образовательный центр медико-социальной экспертизы и реабилитации им. Г. А. Альбрехта Минтруда России
ул. Бестужевская, д. 50, г. Санкт-Петербург 195067, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
ул. Профессора Попова, д. 5, г. Санкт-Петербург 197022, Российская Федерация

e-mail: mikhailishin_v@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Интегративные методы диагностики стопы, объединяющие данные рентгенографии и компьютерной плантографии, позволяют получить целостное представление о морфологии, состоянии суставов и характере контакта стопы с опорой в статике. Разработка таких методов актуальна для повышения информативности и точности анатомической оценки стопы. Цель работы – разработать методику интегративной анатомической оценки стопы.

Методы. Исследование выполнено на 50-ти пациентах в возрасте 18–70 лет, которым проводились компьютерная плантография и рентгенография стопы в прямой проекции. При проведении исследований использованы рентгеноконтрастные металлические маркеры для пространственной привязки изображений. Обработка плантограмм выполнялась с применением ранее разработанного программного обеспечения.

Результаты. Разработана трёхэтапная методика интегративного исследования стопы, включающая выполнение плантографии и рентгенографии с использованием металлических маркеров на стопе, обработку изображений и их послойное совмещение при анализе. Методика обеспечивает точное совмещение снимков за счёт использования маркеров, а также унификацию визуализации данных и воспроизводимость исследования. Получен набор из 50 интегративных исследований стоп. В результате интегративного подхода повышается точность локализации анатомических структур и расширяются возможности комплексного анализа, что важно для планирования ортопедического лечения и мониторинга его эффективности.

Заключение. Предложенная методика представляет интерес для научных исследований и клинической практики ввиду получения унифицированного результата двух различных исследований – плантографии и рентгенографии стопы. Она может быть применима для углублённого анализа структурных изменений стопы, оценки эффективности терапевтических и ортопедических вмешательств, а полученный датасет интегративных результатов может быть применен в образовательных программах и дальнейших исследованиях. Методика также открывает новые перспективы для разработки моделей искусственного интеллекта в анализе мультимодальных медицинских данных, что особенно актуально в условиях развития персонализированной медицины.

Ключевые слова: стопа; компьютерная плантография; рентгенография; интегративное исследование; мультимодальные данные; ортопедия; анатомия.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Смирнова Л. М., Михайлишин В. В. Методика интегративной анатомической оценки стопы // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 4. С. 137–149. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-137-149>

Поступила в редакцию 11.10.2025

Подписана в печать 09.11.2025

Опубликована 26.12.2025

© Смирнова Л. М., Михайлишин В. В., 2025

Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering,
Information Science. Medical Instruments Engineering. 2025;15(4):137–149

The method of integrative anatomical assessment of the foot

Lyudmila M. Smirnova^{1,2}, Viktor V. Mikhailishin¹ 

¹ Federal Scientific and Educational Center for Medical and Social Expertise and Rehabilitation named after G.A. Albrecht Ministry of Labor of Russia
50 Bestuzhevskaya Str., Saint Petersburg 195067, Russian Federation

² St. Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5 Professor Popov Str., Saint Petersburg 197022, Russian Federation

 e-mail: mikhailishin_v@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Foot, computer plantography, radiography, integrative research, multimodal data, orthopedics, anatomy. **Introduction.** Integrative diagnostic methods of the foot, combining X-ray and computer plantography data, allow us to obtain a holistic view of the morphology, condition of the joints and the nature of the contact of the foot with the support in the static. The development of such methods is relevant to increase the information content and accuracy of anatomical assessment of the foot. The purpose of the work is to develop a methodology for integrative anatomical assessment of the foot.

Methods. The study was performed on 50 patients aged 18-70 years who underwent computer plantography and radiography of the foot in a direct projection. During the research, radiopaque metal markers were used for spatial image binding. The plantograms were processed using previously developed software.

Results. A three-stage method of integrative foot examination has been developed, including performing plantography and radiography using metal markers on the foot, image processing and their layered combination during analysis. The technique ensures accurate alignment of images through the use of markers, as well as unification of data visualization and reproducibility of the study. A set of 50 integrative foot studies was obtained. As a result of the integrative approach, the accuracy of localization of anatomical structures increases and the possibilities of complex analysis expand, which is important for planning orthopedic treatment and monitoring its effectiveness.

Conclusion. The proposed technique is of interest for scientific research and clinical practice in view of obtaining a unified result of two different studies – plantography and radiography of the foot. It can be used for in-depth analysis of structural changes in the foot, evaluation of the effectiveness of therapeutic and orthopedic interventions, and the resulting dataset of integrative results can be used in educational programs and further research. The technique also opens up new perspectives for the development of artificial intelligence models in the analysis of multimodal medical data, which is especially important in the context of the development of personalized medicine.

Keywords: foot; computer plantography; radiography; integrative research; multimodal data; orthopedics; anatomy.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Smirnova L.M., Mikhailishin V. V. Evaluation of the accuracy of false alarm frequency control methods for de novo spectrum. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(4):137–149. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-137-149>

Received 11.10.2025

Accepted 09.11.2025

Published 26.12.2025

Введение

Современная медицина и биомеханика уделяют особое внимание стопе, поскольку её патологии приводят к

инвалидности, болевым синдромам и значительному снижению качества жизни [1]. Плоскостопие – одна из таких патологий – ассоциируется со снижением

показателей качества жизни и функций стоп [2]. При развитии плоскостопия нарушается распределение давления на подошвенной поверхности стопы: у людей с уплощённым продольным сводом нагрузка на передний отдел стопы (особенно на плюсневые кости) значительно выше, чем у людей с нормальным сводом [3]. Кроме того, дефекты сводов стопы могут вызывать болевые ощущения не только в самой стопе, но и в мышцах голени, суставах колена и тазобедренных суставах, а также сопровождаться нарушениями походки и равновесия.

Рентгенография стопы на протяжении десятилетий остаётся одним из основных методов визуализации, позволяя детально изучать костную структуру, состояние сводов и суставов стопы [4]. Для количественной оценки степени плоскостопия на рентгенограммах измеряют ряд углов и индексов: угол подъёма пяткиной кости, таранно-плюсневый угол, навикулярный индекс и др. [5]. Тем не менее статические рентгенографические показатели слабо коррелируют с динамической функцией стопы [6]. Это подчёркивает необходимость проведения дополнительных функциональных тестов, таких как анализ походки или бароподиометрия [7].

Компьютерная плантография является методом диагностики функционального состояния стоп, основанным

на получении снимка подошвенной поверхности стопы [8]. Форму внутреннего продольного свода стопы можно оценивать по особенностям плантограммы: различные конфигурации свода отчётливо отражаются в отпечатке стопы и изменяют характер распределения давления на подошве [9]. Для количественной оценки высоты свода стопы применяются классические плантографические индексы: например, индекс Стадели вычисляют как отношение минимальной ширины средней части стопы к максимальной ширине пятки, а индекс Чиппак–Смиряка – как отношение минимальной ширины средней части стопы к максимальной ширине переднего отдела стопы [10]. Статический анализ распределения давления на подошвенной поверхности широко используется для объективной оценки функции стопы и выявления её деформаций (плоскостопия) [11]. Современные системы компьютерной плантографии регистрируют отпечатки стоп в двухмерном формате и могут реконструировать трёхмерную модель стопы после обработки данных [12]. По результатам сканирования автоматически вычисляются подометрические и плантографические показатели, автоматически определяется площадь опоры¹.

Мультимодальная (интегративная) медицинская визуализация играет

¹ Пат. 2814368 С1 Российская Федерация, МПК G16H 50/00, A61B 5/107, G06T 7/12. Способ диагностики состояния стоп человека / Михайлишин В. В., Смирнова Л. М., Михайлишин В. И. [и др.]; заявитель

Общество с ограниченной ответственностью «Перспективные информационные технологии». № 2023124975; заявл. 28.09.23; опубл. 28.02.24. EDN ZITQKK

важную роль в клинической диагностике, объединяя информацию из разных методов визуализации для более полного понимания патологии [13]. Она обеспечивает многомерный анализ состояния пациента и повышает точность диагностики, что позволяет индивидуализировать лечение [14]. Например, совмещённая визуализация на основе ПЭТ и МРТ сочетает метаболическую и анатомическую информацию, что обеспечивает раннее обнаружение опухолей и более точное планирование терапии [15].

Перспективность таких подходов при оценке деформаций переднего и среднего отделов стопы подтверждена исследованиями с применением конусно-лучевой КТ в положении нагрузки (WB-СВСТ) [16]. Это соответствует положениям российского консенсуса по диагностике и лечению плоскостопия, который акцентирует необходимость одновременной оценки статических и динамических параметров стопы [17]. Разработка методики совмещения рентгенографического снимка с изображением, полученным методом компьютерной плантографии, представляет собой шаг к повышению информативности диагностики благодаря созданию целостного представления о морфологической структуре и пространственном положении костей, состоянии суставов и особенностях контакта подошвенной поверхности стопы с опорой в статике.

Цель работы – разработать методику интегративной анатомической оценки стопы.

Материалы и методы

В исследовании использованы плантограммы и рентгенограммы 50 пациентов в возрасте от 18 до 70 лет. Плантограммы получали методом компьютерного оптического планшетного сканирования в позе пациента стоя. Цифровые рентгенограммы получали в прямой проекции с частичной опорой на передний отдел выдвинутой вперед стопы в позе пациента стоя.

Для обработки снимков компьютерной плантографии использован алгоритм обработки плантограмм, позволяющий унифицировать снимки по расположению и масштабу отображения на них изображения стоп для упрощения их дальнейшего анализа [18]. В качестве маркеров для последующего сопоставления плантограмм и рентгенограмм одной и той же стопы применялись диски диаметром 3 мм толщиной 0,5 мм, изготовленные из стали. Крепление маркеров к стопе осуществлялось с помощью медицинского лейкопластиря на тканевой основе.

Результаты и их обсуждение

Разработанная методика включает 3 взаимосвязанных этапа схематично представленных ниже (рис. 1).



Рис. 1. Методика интегративного исследования стопы¹

Fig. 1. The methodology of integrative foot research¹

Согласно разработанной методике, на первом этапе обследуемому выполняют плантографию стоп под нагрузкой весом тела без использования маркеров. Для этого обследуемого устанавливают в позу стоя на выдерживающее вес человека прозрачное опорное стекло оптического планшетного напольного сканирующего устройства и сканированием получают электронные плантограммы с отображением опорного отпечатка стопы на фоне ее вида снизу. При необходимости оценки не только опорной, но и амортизационной функции стопы (дополнительно к плантограмме, соответствующей равной опоре на обе нижние конечности) регистрируют также плантограммы с другой дозой нагрузки на стопу (сниженной или повышенной за счет смещения веса тела в сторону левой / правой конечности).

Затем, в соответствии с разработанным методом совмещения плантограмм

и рентгенограмм, на плюснюю поверхность стопы обследуемого устанавливают рентгеноконтрастные металлические маркеры (рекомендуется не толще 0,5 мм и диаметром не более 3 мм) с липким слоем с одной стороны (например, в виде тонкого двухстороннего скотча) или прикрепленные медицинским лейкопластырем с последующей обводкой их контура. Рекомендуемые места установки маркеров на стопе – контактирующие с опорой области переднего и среднего отелов стопы, не являющиеся проекцией клинически значимых структур. Прикрепление маркеров необходимо для создания единой системы координат, используемой в процессе обследования двумя указанными методами.

После установки маркеров выполняют плантографию и рентгенографию стопы. Рассмотрим пример результата исследований (рис. 2).

¹ Пат. 2844243 С1 Российской Федерации, МПК А61В 5/103. Способ анатомического исследования стопы человека / Михайлишин В. В., Смирнова Л. М., Фадеев В. Д.; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научно-

образовательный центр медико-социальной экспертизы и реабилитации им. Г. А. Альбрехта» Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации. Заявл. 19.12.24; опубл. 28.07.25. EDN TTTONS



Рис. 2. Пример данных мультимодального исследования: *а* – планограмма без маркеров; *б* – планограмма с маркерами; *в* – рентгенограмма с маркерами

Fig. 2. An example of the multimodal research data: *a* – a plantogram without markers; *b* – a plantogram with markers; *c* – an X-ray with markers

Обработка планограмм выполнялась автоматически, по ранее разработанному алгоритму, который включал настройку контрастности и яркости для улучшения визуализации, разделение изображений левой и правой стопы на отдельные снимки, удаление фона изображений и размещение их на однородном черном фоне по центру изображения ориентацией продольной оси изображения стопы вдоль снимка, классификацию стопы (левая или правая) моделью искусственного интеллекта для упрощения дальнейшего анализа [18].

Обработка рентгенограмм выполнялась оператором и включала настройку яркости и контрастности изображения, разделение левой и правой стопы на

отдельные снимки, удаление фона изображений, удаление участков, соответствующих мягким тканям, а также костным элементам, расположенным проксимальнее линии Шопарова сустава, дифференциация которых затруднена. На отдельный слой были вынесены и скрыты кости дистальных отделов фаланг пальцев, что было обосновано различием в положении пальцев при выполнении плантографии и рентгенографии. Пример обработанных изображений представлен ниже (рис. 3).

На заключительном этапе выполнено послойное совмещение обработанных изображений компьютерной плантографии с маркерами и без них и рентгенограммы.

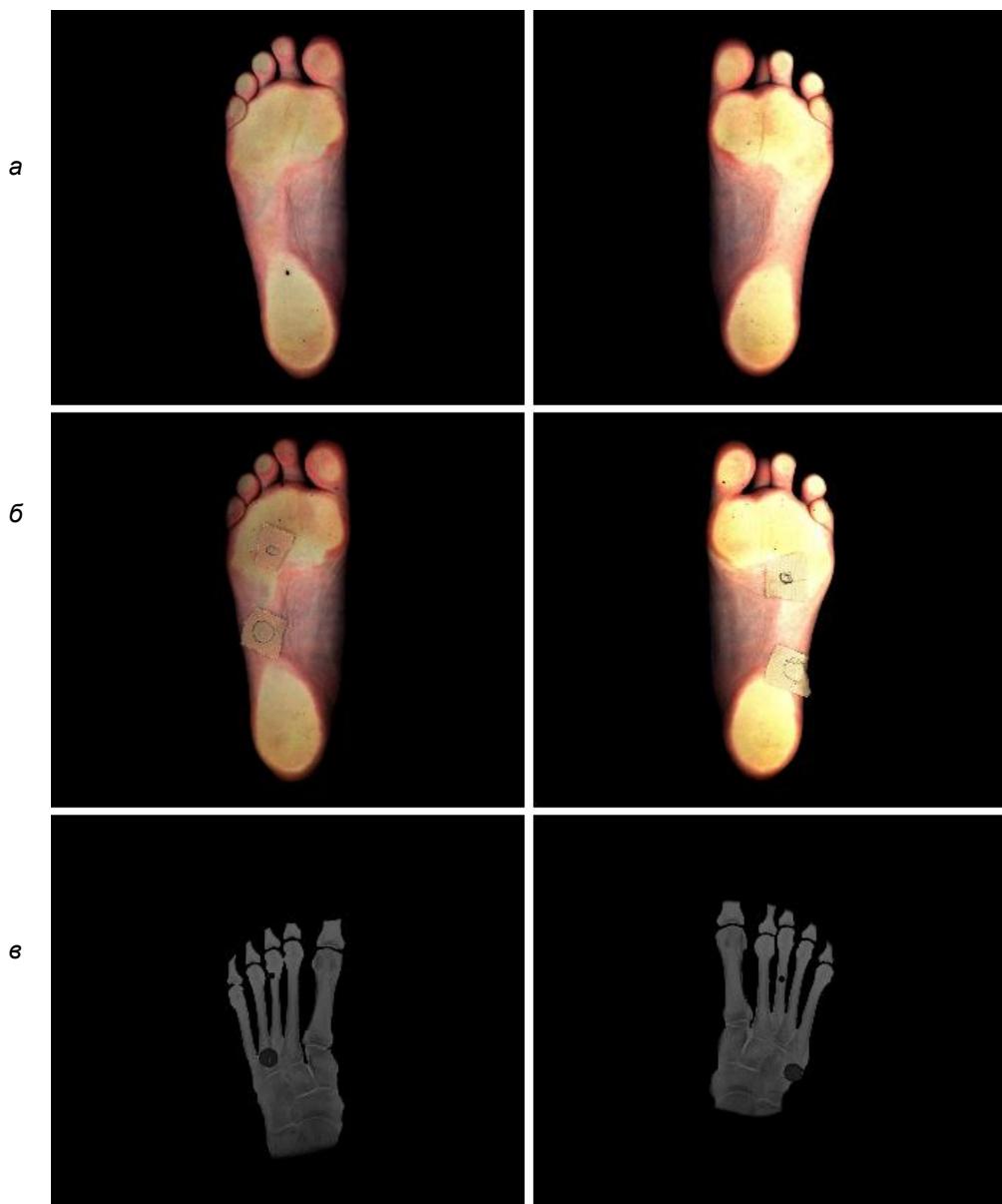


Рис. 3. Пример результата обработки снимков: *а* – плантограмма без маркеров; *б* – плантограмма с маркерами; *в* – рентгенограмма с маркерами

Fig. 3. Example of the result of image processing: *a* – plantogram without markers; *b* – plantogram with markers; *c* – X-ray with markers

Совмещение обработанных плантограмм проводилось автоматическим наложением снимков друг на друга, а рентгенограмм – с использованием поворотов, смещений, растягивания и/или сжатия их таким образом, чтобы одни и те же маркеры на плантограмме и рентгенограмме точно совпадали. Критерием совпадения маркеров принято равенство

значений координат их центров и границ. Рассмотрим пример интегративного результата мультимодального исследования (рис. 4). Для наглядности рентгенографические изображения левой и правой стоп наложены с прозрачностью 40% на плантограмму без маркеров, а плантограммы с маркерами скрыты. Обработка рентгенограмм выполнялась оператором

и включала настройку яркости и контрастности изображения, разделение левой и правой стопы на отдельные снимки, удаление фона изображений, вынесение на отдельный слой участков, соответствующих мягким тканям, а также костным элементам, расположенным проксимальнее линии Шопарова сустава, дифференциация которых

затруднена. Также на отдельный слой были вынесены и скрыты кости дистальных отделов фаланг пальцев, что было обосновано различием в положении пальцев при выполнении плантографии и рентгенографии. Пример обработанных изображений представлен ниже (рис 3).

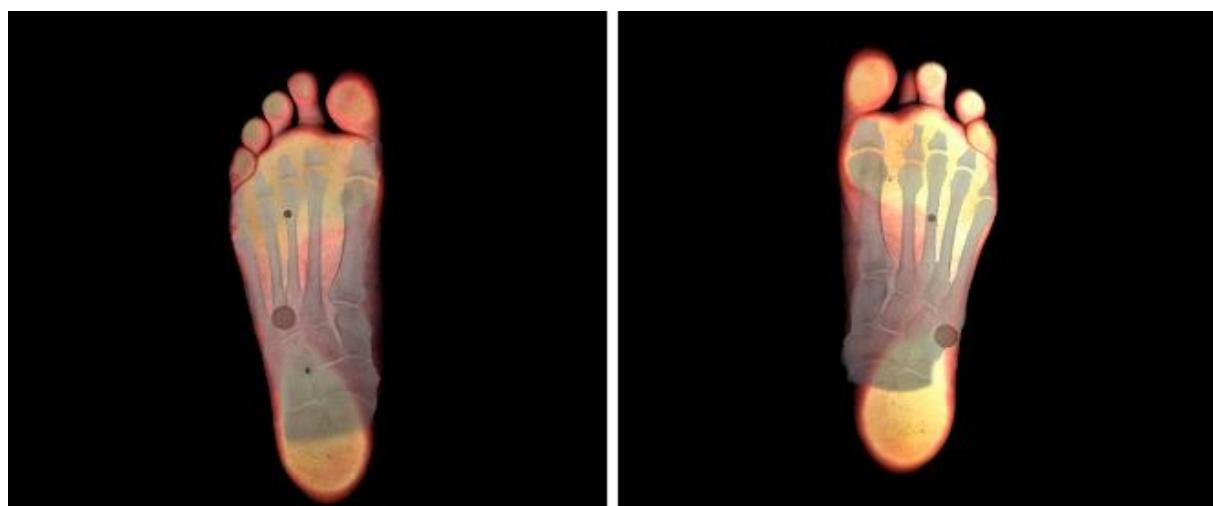


Рис. 4. Пример результата интегративного исследования стопы

Fig. 4. An example of the result of an integrative foot study

По совмещенным друг с другом изображениям электронной плантограммы и электронной рентгенограммы проводят геометрический анализ костных структур стопы, опорного отпечатка и контура стопы. Визуально сопоставляют расположение между собой элементов костных структур стопы и элементов опорного отпечатка и контура стопы.

Причем при анализе изображений плантограммы и рентгенограммы имеется возможность перевода каждого из слоёв на передний или задний план на экране по отношению друг к другу и регулирования прозрачности отдельно каждого из них. Эти манипуляции

необходимы для лучшей визуализации того изображения (плантограммы или рентгенограммы), которое окажется на переднем плане.

Для иллюстрации повышения точности определения положения костных структур стопы на плантограмме по разработанной методике интегративной анатомической оценки стопы, по сравнению с традиционной методикой поочередного сравнения рентгенограммы и плантограммы, пяти врачам-ортопедам предъявлялось задание определить координаты точки, соответствующей середине первого предплюсно-плюсневого сустава каждым из этих методов (рис. 5, табл. 1).

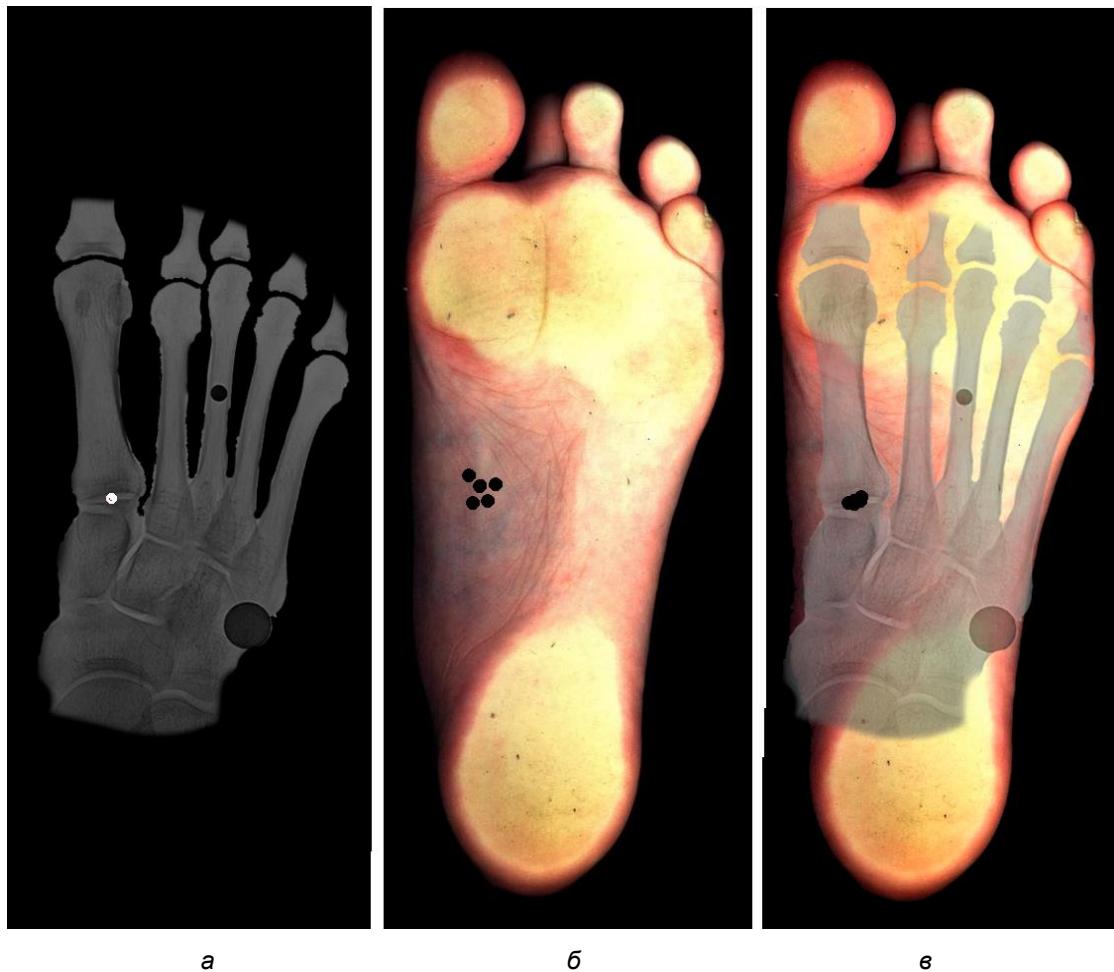


Рис. 5. Определение координат точки, соответствующей середине первого предплюсне-плюсневого сустава у пациента: *а* – рентгенограмма; *б* – результаты поочередного сравнения рентгенограммы и планограммы; *в* – результаты методики интегративной анатомической оценки стопы

Fig. 5. Determination of the coordinates of the point corresponding to the middle of the patient's first tarsal-metatarsal joint: *a* – X-ray; *b* – results of visual comparison of the X-ray and plantogram; *c* – results of the method of integrative anatomical assessment of the foot

Таблица 1. Результаты теста определения координат точки, соответствующей середине первого предплюсне-плюсневого сустава, по оси X

Table 1. Test results for determining the coordinates of the point corresponding to the middle of the first tarsal-metatarsal joint along the X axis

Метод / Method		Координаты точек, px / Coordinates of points, px)				Статистики / Statistics			
		1	2	3	4	5	μ	σ^2	σ
Поочередное сравнение рентгенограммы и планограммы	По оси X	688	688	702	698	676	689,2	117,2	10,8
	По оси Y	525	507	499	526	507	512,8	145,2	12,0
Интегративная анатомическая оценка стопы	По оси X	685	678	680	684	691	683,6	25,3	5,0
	По оси Y	519	519	516	521	519	518,8	3,2	1,8

Таким образом, точность геометрического сопоставления плантограмм и рентгенограмм стопы по разработанной интегративной анатомической оценке стопы оказалась значительно выше по сравнению с визуальным сравнением рентгенограммы и плантограммы. Например, в рассмотренном примере с определением середины первого предплюсно-плюсневого сустава дисперсия σ^2 и стандартное отклонение σ координат указанной искомой точки оказались в несколько раз меньше при применении разработанной методики:

- σ_x^2 – более чем в 4 раза (117,2/25,3),
- σ_y^2 – в 45 раз (145,2/3,2);
- σ_x – в 2 раза (10,8/5,0), σ_y – более 6 раз (12,0/1,8).

Эти преимущества разработанной методики интегративной анатомической оценки стопы делают ее особенно востребованной для обучения по образовательным программам.

Выводы

Разработанная методика интегративной анатомической оценки стопы, основанная на совмещении плантограмм и рентгенограмм с использованием металлических маркеров, включает проведение инструментальных обследований, обработку изображений и их послойное совмещение, что обеспечивает воспроизводимость результатов в унифицированной форме. Полученный в процессе исследования датасет может быть использован в научных исследованиях и образовательных программах, включающих изучение анатомии стопы. Методика обладает потенциалом для эффективного применения в клинической практике и научных исследованиях, позволяя проводить углублённый анализ структурных изменений стопы и оценивать эффективность терапевтических и ортопедических вмешательств.

Список литературы

1. The Assessment of the Quality of Life in Patients with Rheumatoid Foot / M. Chruéciak [et al.] // Current Rheumatology Reviews. 2023. Vol. 19, N 1. P. 83–92.
2. Flat foot in a random population and its impact on quality of life and functionality / S. Pita-Fernandez [et al.] // Journal of clinical and diagnostic research: JCDR. 2017. Vol. 11, N 4. P. LC22.
3. Assessment of the foot's longitudinal arch by different indicators and their correlation with the foot loading paradigm in school-aged children: A cross sectional study / B. Szczepanowska-Wołowiec [et al.] // International journal of environmental research and public health. 2021. Vol. 18, N 10. P. 5196.
4. Adult Acquired Flatfoot deformity: a narrative review about imaging findings / C. Polichetti [et al.] // Diagnostics. 2023. Vol. 13, N 2. P. 225.
5. Diagnostic accuracy of various radiological measurements in the evaluation and differentiation of flatfoot: a cross-sectional study / F. Khan [et al.] // Diagnostics. 2022. Vol. 12, N 10. P. 2288.
6. Is there a correlation between static radiographs and dynamic foot function in pediatric foot deformities? / H. Böhm [et al.] // Foot and Ankle Surgery. 2020. Vol. 26, N 7. P. 801–809.

7. Foot posture index does not correlate with dynamic foot assessment performed via baropodometric examination: A cross-sectional study / D. Origo [et al.] // Healthcare. 2024. Vol. 12, N 8. P. 814.

8. Исследование опорной и рецессорной функции стоп у спортсменов с разной физической нагрузкой методом светооптической компьютерной плантографии / Г. В. Зубик, С. А. Орлов, В. Н. Ахматов, Н. В. Зубик // Достижения современной морфологии: сборник научных статей Международной научно-практической конференции, приуроченной 95-летию профессора П. И. Лобко: в 2 ч. Минск: Белорусский государственный медицинский университет, 2024. С. 236–240. EDN EEWXJX

9. Concordance between pressure platform and pedigraph C. Gonzalez-Martin [et al.] // Diagnostics. 2021. Vol. 11, N 12. P. 2322.

10. Jeevannavar J. S., Watwe Y. A., Shingatgeri P. V. Validity of Arch Height Measuring Tool in Comparison with Chippaux-Smirak Index and Staheli's Arch Index: A Pilot Study // National Editorial Board. 2023. Vol. 17, N 4. P. 45.

11. Toward automated plantar pressure analysis: machine learning-based segmentation and key point detection across multicenter data / C. Dindorf [et al.] // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2025. Vol. 13. P. 1579072.

12. Смолькова Л. В., Долганова Т. И. Количественный анализ динамоплантограмм у детей дошкольного возраста без ортопедической патологии // Современные вопросы биомедицины. 2023. Т. 7, № 1. С. 179–186.

13. Tirupal T., Mohan B. C., Kumar S. S. Multimodal medical image fusion techniques—a review // Current Signal Transduction Therapy. 2021. Vol. 16, N 2. P. 142–163.

14. Medical image fusion method by deep learning / Y. Li [et al.] // International Journal of Cognitive Computing in Engineering. 2021. Vol. 2. P. 21–29.

15. The use of PET/MRI in radiotherapy // Q. Yan [et al.] // Insights into Imaging. 2024. Vol. 15, N 1. P. 63.

16. The Assessment of the Quality of Life in Patients with Rheumatoid Foot / M. Chrućiak [et al.] // Current Rheumatology Reviews. 2023. Vol. 19, N 1. P. 83–92.

17. Diagnostic accuracy of various radiological measurements in the evaluation and differentiation of flatfoot: a cross-sectional study / F. Khan [et al.] // Diagnostics. 2022. Vol. 12, N 10. P. 2288.

18. Assessment of the foot's longitudinal arch by different indicators and their correlation with the foot loading paradigm in school-aged children: A cross sectional study / B. Szczepanowska-Wołowiec [et al.] // International journal of environmental research and public health. 2021. Vol. 18, N 10. P. 5196.

References

1. Chrućiak M., et al. The Assessment of the Quality of Life in Patients with Rheumatoid Foot. *Current Rheumatology Reviews*. 2023;9(1):83–92.
2. Pita-Fernandez S., et al. Flat foot in a random population and its impact on quality of life and functionality. *Journal of Clinical and Diagnostic Research: JCDR*. 2017;11(4):LC22.
3. Szczepanowska-Wołowiec B., et al. Assessment of the foot's longitudinal arch by different indicators and their correlation with the foot loading paradigm in school-aged children:

A cross sectional study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(10):5196.

4. Polichetti C., et al. Adult Acquired Flatfoot deformity: a narrative review about imaging findings. *Diagnostics*. 2023;13(2):225.
5. Khan F., et al. Diagnostic accuracy of various radiological measurements in the evaluation and differentiation of flatfoot: a cross-sectional study. *Diagnostics*. 2022;12(10):2288.
6. Böhm H., et al. Is there a correlation between static radiographs and dynamic foot function in pediatric foot deformities? *Foot and Ankle Surgery*. 2020;26(7):801–809.
7. Origo D., et al. Foot posture index does not correlate with dynamic foot assessment performed via baropodometric examination: A cross-sectional study. *Healthcare*. 2024;12(8):814.
8. Zubik G.V., Orlov S.A., Akhmatov V.N., Zubik N.V. Study of foot support and spring function in athletes with different physical activity by light-optical computer plantography. In: *Dostizheniya sovremennoi morfologii: sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, priurochennoi 95-letiyu professora P. I. Lobko = Achievements of modern morphology: Collection of scientific articles of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 95th anniversary of Professor P.I. Lobko*. Minsk: Belorusskii gosudarstvennyi meditsinskii universitet; 2024. P. 236–240. (In Russ.)
9. Gonzalez-Martin C., et al. Concordance between pressure platform and pedigraph. *Diagnostics*. 2021;11(12):2322.
10. Jeevannavar J.S., Watwe Y.A., Shingatgeri P.V. Validity of Arch Height Measuring Tool in Comparison with Chippaux-Smirak Index and Staheli's Arch Index: A Pilot Study. *National Editorial Board*. 2023;17(4):45.
11. Dindorf C., et al. Toward automated plantar pressure analysis: machine learning-based segmentation and key point detection across multicenter data. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2025;13:1579072.
12. Smolkova L.V., Dolganova T.I. Quantitative analysis of dynamoplantograms in preschool children without orthopedic pathology. *Modern Issues of Biomedicine*. 2023;7(1):179–186. (In Russ.)
13. Tirupal T., Mohan B.C., Kumar S.S. Multimodal medical image fusion techniques—a review. *Current Signal Transduction Therapy*. 2021;16(2):142–163.
14. Li Y., et al. Medical image fusion method by deep learning. *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*. 2021;2:21–29.
15. Yan Q., et al. The use of PET/MRI in radiotherapy. *Insights into Imaging*. 2024;15(1):63.
16. Chruéciak M., et al. The Assessment of the Quality of Life in Patients with Rheumatoid Foot. *Current Rheumatology Reviews*. 2023;19(1):83–92.
17. Khan F., et al. Diagnostic accuracy of various radiological measurements in the evaluation and differentiation of flatfoot: a cross-sectional study. *Diagnostics*. 2022;12(10):2288.
18. Szczepanowska-Wołowiec B., et al. Assessment of the foot's longitudinal arch by different indicators and their correlation with the foot loading paradigm in school-aged children: A cross sectional study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(10):5196.

Информация об авторах / Information about the Authors

Смирнова Людмила Михайловна, ведущий научный сотрудник отдела биомеханических исследований опорно-двигательной системы, Институт протезирования и ортезирования, Федеральный научно-образовательный центр медико-социальной экспертизы и реабилитации им. Г. А. Альбрехта Минтруда России, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: info@diaserv.ru, ORCID: 0000-0003-4373-9342

Михайлишин Виктор Валерьевич, начальник отдела цифровых технологий реабилитации, Институт реабилитации и абилитации инвалидов, Федеральный научно-образовательный центр медико-социальной экспертизы и реабилитации им. Г. А. Альбрехта Минтруда России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: mikhailishin_v@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9518-1945

Lyudmila M. Smirnova, Leading Researcher at the Department of Biomechanical Research of the Musculoskeletal System, Institute of Prosthetics and Orthotics, Federal Scientific and Educational Center for Medical and Social Expertise and Rehabilitation named after G.A. Albrecht Ministry of Labor of Russia, St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: info@diaserv.ru, ORCID: 0000-0003-4373-9342

Viktor V. Mikhailishin, Head of the Department of Digital Technologies of Rehabilitation, Institute of Rehabilitation and Habilitation of the Disabled, Federal Scientific and Educational Center for Medical and Social Expertise and Rehabilitation named after G. A. Albrecht Ministry of Labor of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: mikhailishin_v@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4373-9342

Исследования алгоритмов нейросетевого распознавания динамической подписи пользователя в пространстве отсчетов многомерных кривых в сравнении с оптимальными алгоритмами обнаружения-различений многомерных сигналов

А. Х. Танцеров¹, Е. А. Данилов¹ 

¹ Пензенский государственный технологический университет
пр. Байдукова / ул. Гагарина, д. 1а / 11, г. Пенза 440039, Российская Федерация

 e-mail: danilov@penzgtu.ru

Резюме

Цель исследования. Высокая степень распространения динамической подписи в различных областях, связанных с биометрическими технологиями (во многих странах четко сформулированы правовые процедуры для их использования), обуславливает значительное внимание к достоверности соответствующих алгоритмов биометрической аутентификации. Динамическая подпись частично свободна от недостатков, свойственных статической подписи, однако и для нее остро стоит проблема достоверности аутентификации пользователя информационными сервисами, обусловленная совокупностью разнородных факторов, поэтому целью проведенного исследования является повышение достоверности аутентификации пользователя по реализации его динамической подписи на основе экспериментально-структурного и параметрического синтеза проблемно ориентированных нейронных сетей и сравнения достоверности с классическими алгоритмами обнаружения-различений многомерных сигналов.

Методы. Алгоритм комплексной идентификации динамической сигнатуры подписи пользователя в пространстве отсчетов многомерных кривых в форме параллельного распознавания многомерного фрагмента кривой различными обнаружителями / классификаторами с последующим комплексированием и анализом результатов.

Результаты. Экспериментально исследованы алгоритмы нейросетевой идентификации динамической сигнатуры подписи пользователя в пространстве отсчетов многомерных кривых в сравнении с оптимальными алгоритмами обнаружения-различений многомерных сигналов. Эксперименты показали, что 3–5 основных параметров: две координаты пера в плоскости реализации планшета, давление на экран в совокупности с векторами скорости пера – обеспечивают приемлемую достоверность идентификации в интервале 0,8...0,95 в условиях малого числа пользователей и сохраняются на уровне 0,7 при их неограниченном увеличении. Средний выигрыш от применения разработанных моделей и алгоритмов идентификации подписи по сравнению со статистическими методами составил 25–35%, по сравнению с метрическими – от 5 до 15%.

Заключение. Для обеспечения заданных показателей надежности аутентификации пользователя необходимо декомпозировать аппаратно-программные модели идентификации динамической подписи по группам небольшого числа пользователей. Существуют оптимальное число и набор алгоритмов, которые доставляют максимум достоверности результата комплексирования: метрический в евклидовой метрике, корреляционный и нейросетевой.

Ключевые слова: динамическая подпись; идентификация; многослойная нейронная сеть; алгоритм Кульбака-Лейблера; кросс-корреляция; многомерная кривая.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Танцеров А. Х., Данилов Е. А. Исследования алгоритмов нейросетевого распознавания динамической подписи пользователя в пространстве отсчетов многомерных кривых в сравнении с оптимальными алгоритмами обнаружения-различений многомерных сигналов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 4. С. 150–161. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-150-161>

Поступила в редакцию 08.10.2025

Подписана в печать 06.11.2025

Опубликована 26.12.2025

Research on neural network algorithms for user dynamic signature recognition in the space of multidimensional curve samples, in comparison with optimal detection–discrimination algorithms for multidimensional signals

Alexander K. Tantserov¹, Evgeny A. Danilov¹ 

¹ Penza State Technological University
1a / 11 Baydukov pass. / Gagarin Str., Penza 440039, Russian Federation

✉ e-mail: danilov@penzgtu.ru

Abstract

Purpose of research. The widespread adoption of dynamic signatures in various biometric technology applications-supported by clearly defined legal procedures in many countries-drives significant attention toward the reliability of corresponding biometric authentication algorithms. While dynamic signatures are partially free from the drawbacks inherent in static signatures, the problem of authentication reliability remains critical due to the complex interplay of heterogeneous factors. Therefore, the aim of this study is to improve the reliability of user authentication based on the dynamic signature using experimental structural and parametric synthesis of problem-oriented neural networks and comparison with classical detection-discrimination algorithms for multidimensional signals.

Methods. The proposed method involves comprehensive identification of the user's dynamic signature in the sample space of multidimensional curves by means of parallel recognition of curve fragments using multiple detectors/classifiers, followed by integration and analysis of the results.

Results. Neural network algorithms for identifying the user's dynamic signature in the sample space of multidimensional curves were experimentally studied and compared with optimal detection-discrimination algorithms for multidimensional signals. The experiments demonstrated that 3–5 key parameters-including two stylus coordinates on the tablet plane, screen pressure, and stylus velocity vectors-ensure acceptable identification reliability in the range of 0,8 to 0,95 for a small number of users, and maintain a reliability level of about 0,7 with unlimited user scaling. The average gain in accuracy from using the developed models and algorithms, compared to statistical methods, amounted to 25–35%, and compared to metric methods, 5–15%.

Conclusion. To achieve the required reliability of user authentication, hardware-software identification models for dynamic signatures should be decomposed into groups with a limited number of users. There exists an optimal combination of algorithms that delivers maximum accuracy in result integration: Euclidean metric, correlation-based, and neural network classifiers.

Keywords: dynamic signature; identification; multilayer neural network; Kullback-Leibler algorithm; cross-correlation; multidimensional curve.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Tantserov A.K., Danilov E.A. Research on neural network algorithms for user dynamic signature recognition in the space of multidimensional curve samples, in comparison with optimal detection–discrimination algorithms for multidimensional signals. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(4):150–161. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-150-161>

Received 08.10.2025

Accepted 06.11.2025

Published 26.12.2025

Введение

Динамические биометрические методы аутентификации приобретают массовое распространение в большинстве персональных [1] и корпоративных электронных устройств и систем [2]. Однако для динамической подписи остро стоит проблема достоверности аутентификации, обусловленная зависимостью ее реализации от параметров датчико-преобразующей аппаратуры, вариабельностью постановки для одного и того же носителя [3], обусловленной эмоциями, стрессом, усталостью, влиянием алкоголя или психотропных веществ, нейромоторными изменениями после приема лекарств, эффектами биологического старения, когнитивно-моторными нарушениями, настроением человека, временем, доступным для постановки подписи [4], или, собственно, готовностью к взаимодействию с системой аутентификации личности [5]. При этом актуальной является проблема, характеризующаяся непредсказуемостью, межличностной изменчивостью, позволяющая реализовать не обнаруживаемую со 100% вероятностью подделки [6]. Одним из направлений разрешения данной проблемы является расширение пространства признаков идентификации [7] и регуляризация решения задачи распознавания, обусловленной ненаблюдаемыми состояниями пользователя и аппаратуры

регистрации, на основе методологии решения некорректных задач [8]. Для многомерных кривых динамической подписи задача заключается в инвариантном представлении комбинаторного множества идентифицируемых математических объектов и поиске оптимального классификационного решения для ограниченного объема внутриклассовых выборок [9]. Современное направление, активно развивающееся для работы с большими объемами и подобным характером идентифицируемых данных, представлено методологией и средствами машинного обучения [9].

Материалы и методы

Исходными данными для решения задачи идентификации пользователя являются шаблоны его динамической сигнатуры подписи, представленные в виде многомерной кривой [10]. В качестве фактуры исходных данных для синтеза таких шаблонов используются открытые базы данных, содержащие до десятка параметров, динамической реализации подписи и поддельной подписи пользователя [11]. Шаблон (или эталон) представляет собой математическую кривую, вложенную в многомерное (по числу параметров) пространство (рис. 1), как результат таксономии множества реализаций динамической подписи одного и того же пользователя [12].

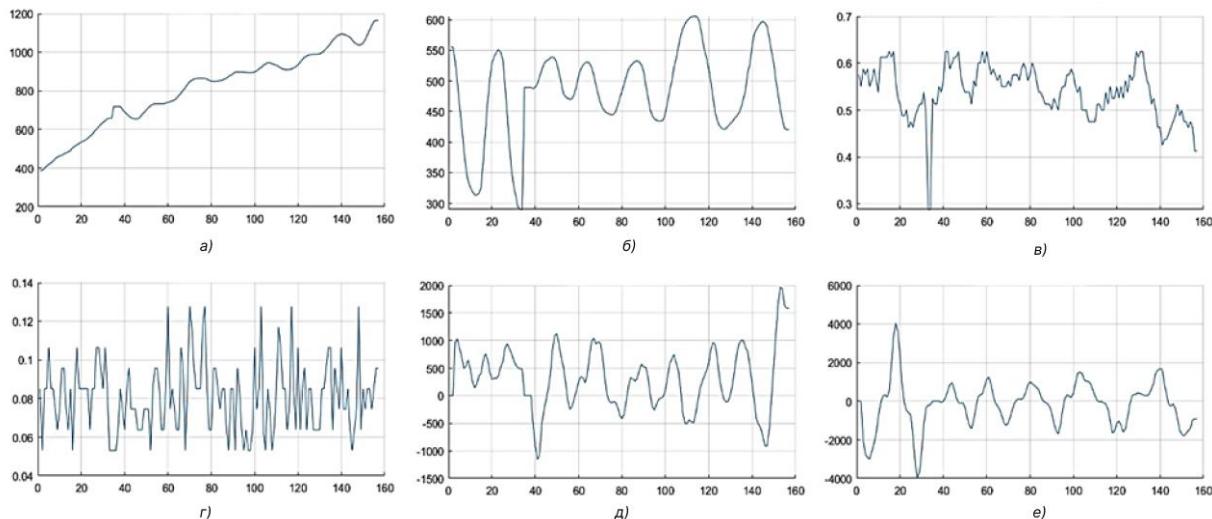


Рис. 1. Пример реализации девятимерной кривой – образца динамической подписи на интервале 180 отсчетов (2,5 с): *а* – координата пера *x*; *б* – координата пера *y*; *в* – давление пера; *г* – площадь контакта; *д* – скорость пера по оси *x*; *е* – скорость пера по оси *y*

Fig. 1. Example of the implementation of a nine-dimensional curve, representing a dynamic signature sample over an interval of 180 samples (2,5 s): *a* – pen x-coordinate; *b* – pen y-coordinate; *c* – pen pressure; *d* – contact area; *e* – pen velocity along the x-axis; *f* – pen velocity along the y-axis

Основным инструментом для распознавания фрагментов многомерной кривой подписи является многослойная

нейронная сеть (НС) ВProp [13], архитектура которой представлена ниже (рис. 2, *a*).

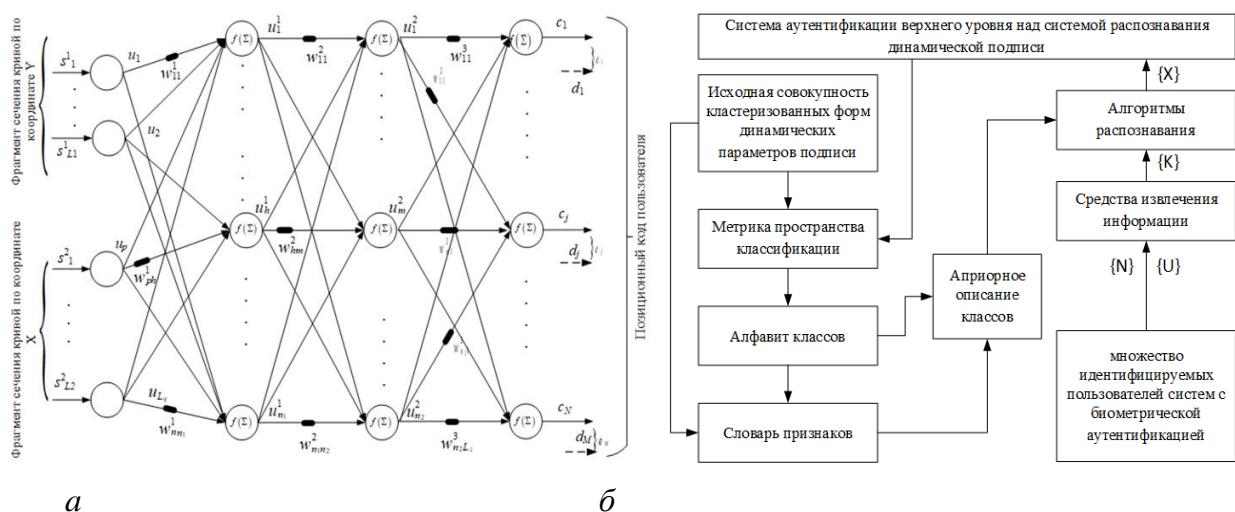


Рис. 2. Применение алгоритмов распознавания динамической подписи: *а* – архитектура многослойной нейронной сети; *б* – общая схема взаимодействия модулей распознавания

Fig. 2. Application of dynamic signature recognition algorithms: *a* – architecture of a multilayer neural network; *b* – general scheme of interaction of recognition modules

Описание процесса постановки динамической подписи [14] и процесса распознавания (для повышения достоверности

и надежности) несколькими алгоритмами [15] с последующим мажоритарным голосованием организуется в

соответствии со схемой взаимодействия модулей (рис. 2, б).

В основе исследовательской базы данных и доказательной фактуры настоящих исследований лежит база данных MOBLSIG [16], представляющая собой набор динамических подписей 83 пользователей (49 мужчин, 34 женщины),

полученных с помощью мобильного устройства с емкостным сенсорным экраном (планшет Nexus 9, Android 6.0) [17]. Данные каждого пользователя содержат 45 истинных и 20 поддельных реализаций его подписи, каждая из которых представлена в формате файла «*.csv» (рис. 3).

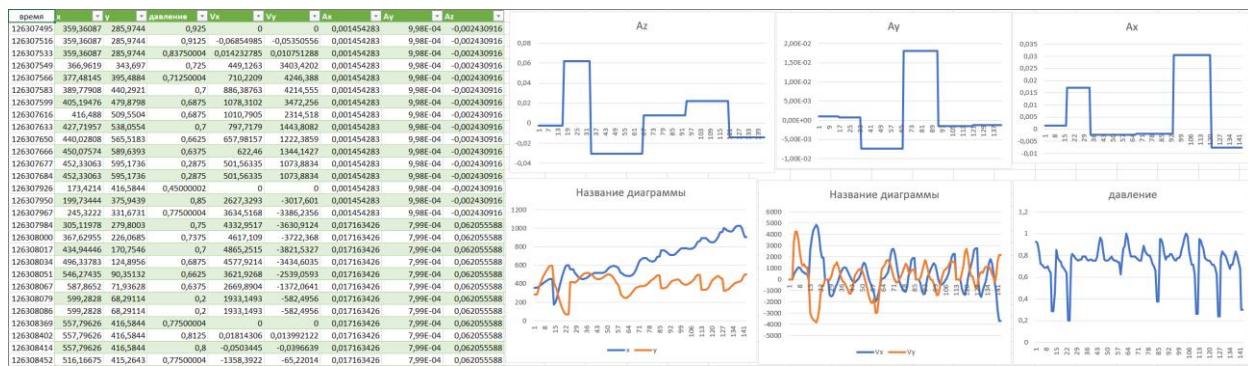


Рис. 3. Исходное файловое представление динамической подписи

Fig. 3. Original file representation of a dynamic signature

Файл содержит от 120 до 160 отсчетов по одиннадцати параметрам динамической подписи, из которых в силу зашумленности и слабой информативности используются восемь:

- 1) x – проекция текущего положения пера на ось x ;
- 2) y – проекция текущего положения пера на ось y ;
- 3) $pressure$ – текущая сила давления пера на экран;
- 4) $velocity_{xh}$ – проекция вектора скорости пера на ось x ;

5) $velocity_{yy}$ – проекция вектора скорости пера на ось y ;

6) $accelx$ – проекция ускорения пера на ось x ;

7) $accely$ – проекция ускорения пера на ось y .

8) $accelz$ – проекция ускорения пера на ось z .

Рассмотрим общую структуру макета программного комплекса моделирования процессов эталонирования и распознавания реализаций динамической подписи пользователя (рис. 4).

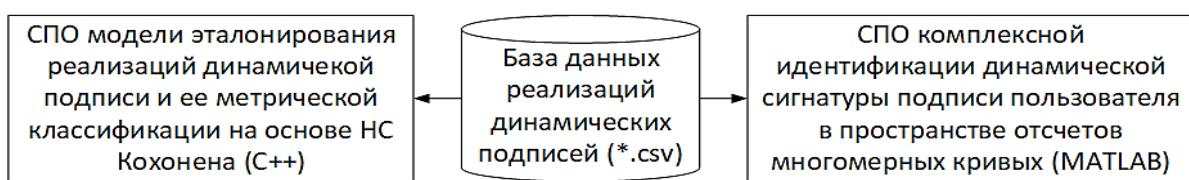


Рис. 4. Общая структура макета программного комплекса

Fig. 4. General structure of the software system prototype

В результате реализации сценария образования обучающих и проверочных выборок формируются параллелепипеды размерностью $n = 3$ с размерами $[l_1, l_2, l_3]$, где l_1 – число реализаций динамической подписи; l_2 – максимальная длительность подписи (отсчётов); l_3 – число кривых каждой подписи.

Нейросетевые алгоритмы распознавания используют два типа архитектуры сетей – со скалярной и векторной функцией выхода (вида $[-1, -1, \dots, -1, 1, -1, \dots, -1]$, где позиция единицы как компонент вектора указывает на реализацию конкретного пользователя) (рис. 5). Корректи-

ровка весов осуществлялась на основании алгоритма Левенберга – Марквардта [7]:

$$w_j(k+1) = w_j(k) + (J_j(k)J_j^T(k) + \chi I)^{-1} \times \\ \times J_j(k)(d_j(k) - f(w_j^T(k)x(k))), \quad (1)$$

где χ – скалярный параметр; I – единичная матрица; $d_j(k)$ – выход j -го нейрона вы-

ходного слоя; $J_j(k) = \nabla_{W_j} f(w_j^T x(k))$ – якобиан, матрица частных производных по весам w_j на k -й итерации обучения.

По результатам обучения формируются графики сходимости НС и визуализируются кривые подписей, использованные как входные векторы (рис. 6).

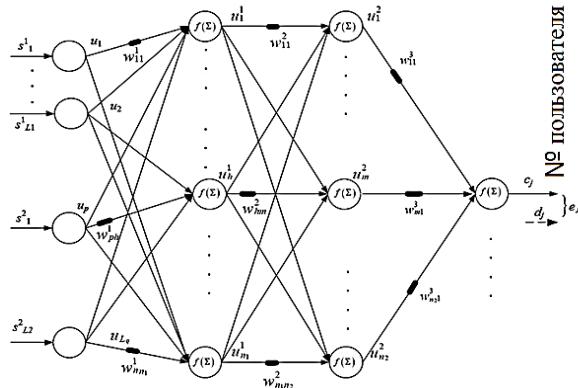


Рис. 5. Архитектуры НС вида BProp для идентификации многомерной реализации динамической подписи

Fig. 5. BProp-type neural network architectures for multidimensional dynamic signature identification

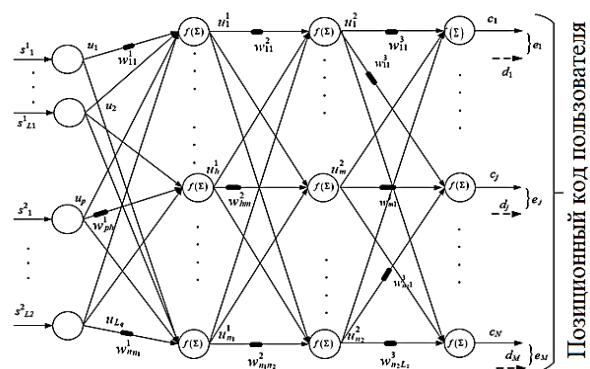


Рис. 6. Кривые подписей, использованные как входные векторы НС

Fig. 6. Signature curves used as input vectors of the neural network

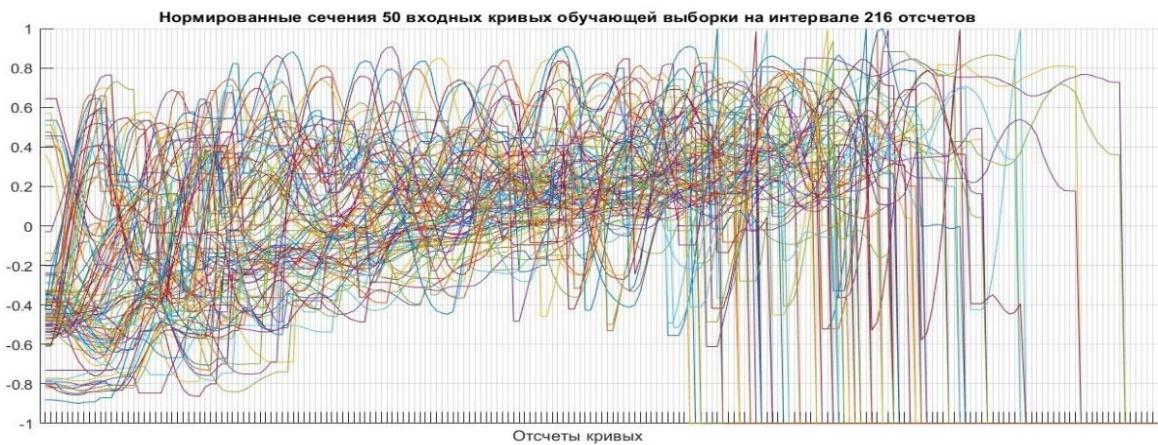


Рис. 6. Кривые подписей, использованные как входные векторы НС

Fig. 6. Signature curves used as input vectors of the neural network

Графический анализ такого рода данных позволяет экспертным способом оптимизировать процесс параметрического синтеза сети.

Результаты и их обсуждение

Число скрытых слоев НС в экспериментах варьировалось от одного до

четырех при максимальной длине одной реализации подписи в 260 отсчетах. На рисунке 7 представлены усредненные по 30-ти точкам, 6-ти алгоритмам зависимости достоверности идентификации пользователя от числа кривых его динамической сигнатуры, участвующих в распознавании.

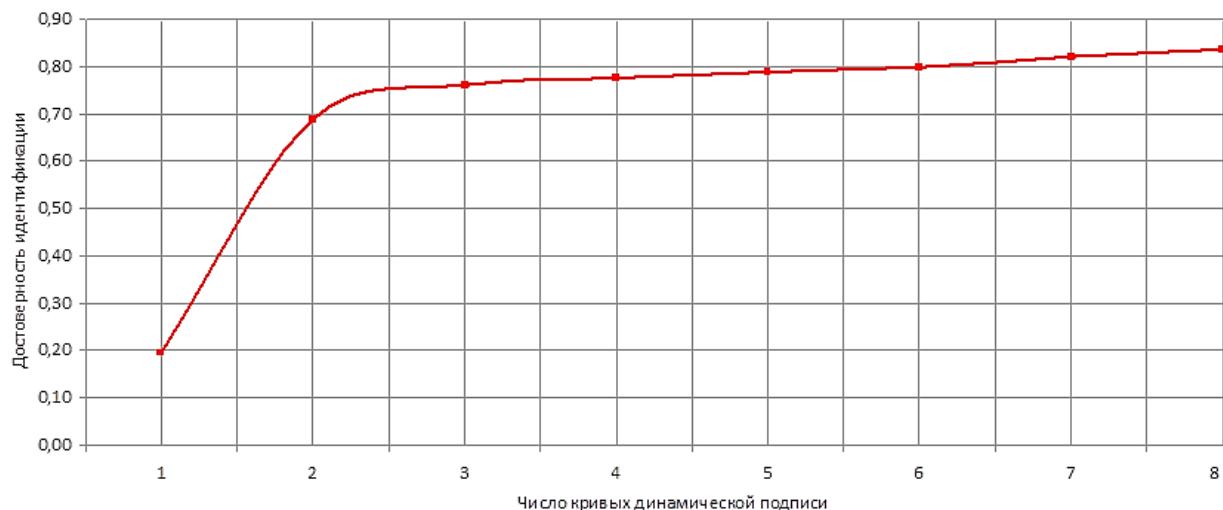


Рис. 7. Усредненная зависимость достоверности идентификации от числа кривых по выборке из 50-ти пользователей (в каждой точке графика усредненные результаты распознавания 10-ти пользователей из протокола испытаний (проверочной выборки), по 20 реализаций подписи каждого)

Fig. 7. Average dependence of identification reliability on the number of curves for a sample of 50 users (each point of the graph shows the averaged recognition results for 10 users from the test protocol (validation set), with 20 signature realizations per user)

Зависимость свидетельствует о том, что 3-5 основных параметров: две координаты x и y в плоскости реализации планшета, давление на экран в совокупности с векторами скорости пера по x и y – обеспечивают приемлемую достоверность идентификации.

Дальнейший рост числа кривых позволяет незначительно повысить достоверность [18], при этом сильно увеличив ресурсоемкость вычислений, т. к. алгоритм Левенберга – Марквардта требует построения матрицы Якоби J [19]:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(x_1, w)}{\partial w_1} & \dots & \frac{\partial F(x_1, w)}{\partial w_M} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial F(x_N, w)}{\partial w_1} & \dots & \frac{\partial F(x_N, w)}{\partial w_M} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $F(x_i, w)$ – значение выхода НС на i -й входной вектор X .

На рисунке 8 приведена усреднённая зависимость достоверности идентификации кривой (а по ней и пользователя) в зависимости от числа примеров обучающей выборки и числа пользователей.

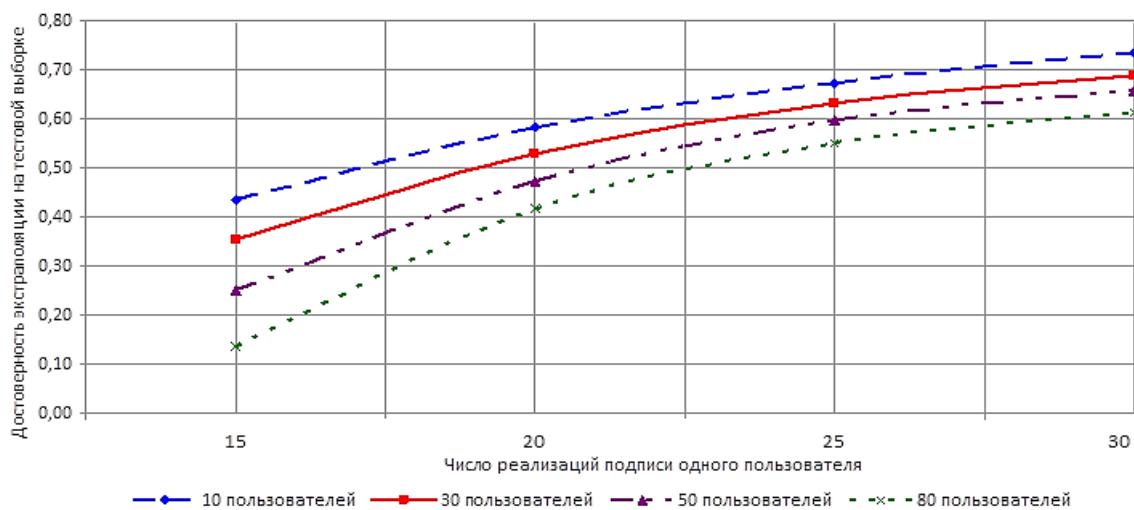


Рис. 8. Зависимость достоверности идентификации динамической подписи в зависимости от числа примеров обучающей выборки при фиксированном числе пользователей

Fig. 8. Dependence of dynamic signature identification reliability on the number of training samples for a fixed number of users

Анализ кривых (рис. 8) позволяет предположить, что для обеспечения заданных показателей надежности аутентификации пользователя необходимо декомпозировать аппаратно-программные модели идентификации динамической подписи по группам небольшого числа пользователей [20].

На рисунке 9 представлены зависимости идентификации динамической подписи пользователя от числа пользователей при фиксированных архитектурных параметрах НС, объемов обучающих – проверочных выборок.

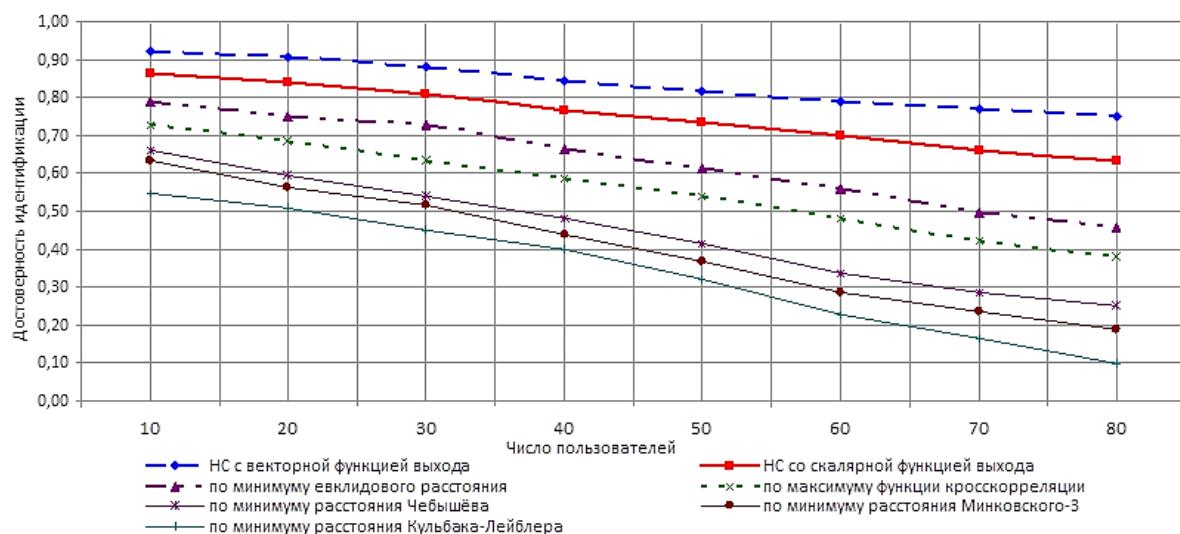


Рис. 9. Зависимость достоверности идентификации динамической подписи пользователя от числа пользователей (обучающих реализаций – 30, проверочных – 15 по каждому пользователю, кривых – 5 $[x, y, p, v_x, v_y]$)

Fig. 9. Dependence of dynamic signature identification reliability on the number of users (30 training realizations and 15 test realizations per user, 5 curves per signature $[x, y, p, v_x, v_y]$)

Графический анализ зависимостей (рис. 9) свидетельствует о преимуществах НС с векторной функцией выхода над остальными алгоритмами. Статистический алгоритм Кульбака – Лейблера предсказуемо показал низкую достоверность в силу наличия шумов микротремора руки при постановке, что может быть компенсировано адаптивным сглаживанием в схеме аппаратно-программного комплекса биометрической аутентификации. Средний выигрыш от применения разработанных моделей и алгоритмов идентификации подписи по сравнению со статистическими методами составил 25–35%, по сравнению с метрическими – от 5 до 15%.

Выводы

Экспериментально исследованы алгоритмы нейросетевой идентификации динамической сигнатуры подписи пользователя в пространстве отсчетов многомерных кривых в сравнении с оптимальными алгоритмами обнаружения – различий многомерных сигналов. Эксперименты показали, что 3–5 основных параметров: две координаты пера в плоскости реализации планшета, давление на

экран в совокупности с векторами скорости пера – обеспечивают приемлемую достоверность идентификации в интервале 0,8…0,95 в условиях малого числа пользователей и сохраняются на уровне 0,7 при их неограниченном увеличении.

Для обеспечения заданных показателей надежности аутентификации пользователя необходимо декомпозировать аппаратно-программные модели идентификации динамической подписи по группам небольшого числа пользователей. Существует оптимальное число и набор алгоритмов, доставляющих максимум достоверности результата комплексирования: метрический в евклидовой метрике, корреляционный и нейросетевой. Эксперименты показали преимущества НС с векторной функцией выхода над остальными алгоритмами. Статистический алгоритм Кульбака – Лейблера показал низкую достоверность в силу наличия шумов микротремора руки при постановке, что может быть компенсировано адаптивным сглаживанием в схеме аппаратно-программного комплекса биометрической аутентификации.

Список литературы

1. Биометрия в финансовой сфере 2020: выгоды для потребителя. Аналитическая записка. URL: <https://www.fintechru.org/upload/iblock/659/g6k39ftq1hkehkn4b22znw1vsfa9lsrg.pdf?ysclid=mjlc9613ot802675625> (дата обращения: 04.09.2025).
2. Ломов Н., Петрова Д., Рязанцева Ю. Биометрия в финансовой сфере 2020: Выгоды для потребителя // Аналитическая записка. URL: https://www.fintechru.org/analytics/analiticheskaya-zapiska-po-biometrii/?ysclid=lvwb2x_h8z610856013 (дата обращения: 06.09.2025).
3. Биометрия: что это и как она влияет на мир финансов // Frank Media. URL: <https://frankmedia.ru/137504?ysclid=lvwb85nb3o106633262> (дата обращения: 05.05.2025).
4. Отчет об анализе размера, доли и тенденций мирового рынка биометрических систем – обзор отрасли и прогноз до 2032 года. URL:

<https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-biometric-system-market?ysclid=1vvg0cfco7989485412> (дата обращения: 05.09.2025).

5. Handbook of Biometric Anti-Spoofing. Presentation Attack Detection and Vulnerability Assessmen / S. Marcel, M. S. Nixon, J. Fierrez, N. Evans. Singapore: Springer, 2023. 595 p.

6. Jain A. K., Griess F. D., Connell S. D. Online signature verification // Pattern Recognition. 2022. N 35. P. 2963–2972.

7. Ростовцев В. С. Искусственные нейронные сети. 4-е изд. СПб.: Лань. 2024. 216 с.

8. Бишоп К. М. Распознавание образов и машинное обучение. СПб.: Диалектика, 2020. 960 с.

9. Carmona P. L., Salvador S. A., Fred L. N. Mathematical Methodologies in Pattern Recognition and Machine Learning: Contributions from the International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods. Springer, 2020. 204 p.

10. Kevin P. Murphy. Probabilistic Machine Learning: Advanced Topics. MIT Press, 2023. 1175 p.

11. Rawlson K. Explainer: Signature Recognition. URL: <https://www.biometricupdate.com/201601/explainer-signature-recognition> (дата обращения: 26.09.2025).

12. Signature Verification System // Elsevier. Marketing. URL: <https://www.elsevier.marketing/journal/Pattern-Recognition> (дата обращения: 26.09.2025).

13. Танцеров А. Х., Данилов Е. А. Кинематическая модель формирования эталонных динамических параметров подписи пользователя // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 92. С. 170–178. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2025-92-170-178>

14. Learning hierarchical features for scene labeling / C. Farabet, C. Couprie, L. Najman, Y. LeCun // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2023. N 8 (35). P. 1915–1929.

15. Сюй А., Аминиан А. System Design. Машинное обучение. Подготовка к сложному интервью. СПб.: Питер, 2024. 320 с.

16. Танцеров А. Х., Данилов Е. А., Мартышкин А. И. Обзор и сравнение некоторых методов аутентификации подписи по динамическим параметрам // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 92. С. 213–224. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2025-92-213-224>

17. Антал М., Сабо Л. Ж, Тордаи Т. Онлайн-проверка подписи на корпусе отпечатков пальцев MOBISIG, 2018. URL: <http://www.ms.sapientia.ro/~manyi/mobisig/MOBISIG.ZIP>, (дата обращения: 01.09.2025).

18. Suratgar A. A., Tavakoli M. B., Hoseinabadi A. Modified Levenberg-Marquardt method for neural networks training. 2022. P. 1745–1747.

19. Sousa C. Neural network learning by the Levenberg-Marquardt algorithm with Bayesian regularization (part 1). URL: http://crsouza.blogspot.com/2009/11/neural-network-learning-by-levenberg_18.html (дата обращения: 05.09.2025).

20. Танцеров А. Х., Данилов Е. А. Современные подходы к распознаванию и аутентификации подписей: методы обработки изображений // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2025. Т. 14, № 2 (70). С. 71–76. EDN SCSZTT

References

1. Biometrics in the financial sector 2020: benefits for the consumer. Analytical note. (In Russ.) Available at: <https://www.fintechru.org/upload/iblock/659/g6k39ftq1hkehkn4b22znw1vsfa9lsrg.pdf?ysclid=mjlc9613ot802675625> (accessed: 04.09.2025).
2. Lomov N., Petrova D., Ryazantseva Y. Biometrics in the financial sector 2020: Benefits for consumers // Analytical note. (In Russ.) Available at: <https://www.fintechru.org/analyt-ics/analiticheskaya-zapiska-po-biometrii/?ysclid=lvwb2xh8z610856013> (accessed 06.09.2025).
3. Biometrics: what it is and how it affects the world of finance. Frank Media. (In Russ.) Available at: <https://frankmedia.ru/137504?ysclid=lvwb85nb3o106633262> (accessed 05.09.2025).
4. Report on the analysis of the size, share and trends of the global biometric systems market – industry overview and forecast up to 2032. (In Russ.) Available at: <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/global-biometric-system-mar-ket?ysclid=lvwg0cfco7989485412> (accessed 05.09.2025).
5. Marcel S., Nixon M. S., Fierrez J., Evans N. Handbook of Biometric Anti-Spoofing. Presentation Attack Detection and Vulnerability Assessmen. Singapore: Springer; 2023. 595 p.
6. Jain A.K., Griess F.D., Connell S.D. Online signature verification. *Pattern Recognition*. 2022;(35):2963–2972.
7. Rostovtsev V.S. Artificial neural networks. 4th ed. Saint Petersburg: Lan'; 2024. 216 p. (In Russ.)
8. Bishop K.M. Pattern recognition and machine learning. Saint Petersburg: Dialektika; 2020. 960 p. (In Russ.)
9. Carmona P.L., Salvador S.A., Fred L.N. Mathematical Methodologies in Pattern Recognition and Machine Learning: Contributions from the International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods. Springer; 2020. 204 p.
10. Kevin P. Murphy. Probabilistic Machine Learning: Advanced Topics. MIT Press; 2023. 1175 p.
11. Rawlson K. Explainer: Signature Recognition. Available at: <https://www.biometricupdate.com/201601/explainer-signature-recognition> (accessed 26.09.2025).
12. Signature Verification System. Elsevier. Marketing. Available at: <https://www.elsevier.marketing/journal/Pattern-Recognition> (accessed 26.09.2025).
13. Tantserov A.Kh., Danilov E.A. Kinematic model of the formation of the etalon dynamic parameters of the user's signature. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radio-tehnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University*. 2025;(92):170–178. (In Russ.) <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2025-92-170-178>
14. Farabet C., Couprie C., Najman L., LeCun Y. Learning hierarchical features for scene labeling. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2023;(8):1915–1929.
15. Xu A., Aminian A. System Design. Machine learning. Preparation for a difficult interview. Saint Petersburg: Piter; 2024. 320 p. (In Russ.)
16. Tantserov A.Kh., Danilov E.A., Martyshkin A.I. Review and comparison of some methods of signature authentication by dynamic parameters. *Bulletin of the Russian State*

Radio Engineering University. 2025;(92):213–224. (In Russ.) <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2025-92-213-224>

17. Antal M., Szabo L. J., Tordai T. Online verification of the signature on the fingerprint case MOBISIG, 2018. (In Russ.) Available at: <http://www.ms.sapientia.ro/~manyi/mobisig/MOBISIG.ZIP> (accessed 01.09.2025).
18. Suratgar A.A., Tavakoli M.B., Hoseinabadi A. Modified Levenberg-Marquardt method for neural networks training. 2022. P. 1745–1747.
19. Sousa C. Neural network learning by the Levenberg-Marquardt algorithm with Bayesian regulation (part 1). Available at: http://crsouza.blogspot.com/2009/11/neural-network-learning-by-levenberg_18.html (accessed 05.09.2025).
20. Tanzerov A.Kh., Danilov E.A. Modern approaches to signature recognition and authentication: image processing methods. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plus = XXI Century: the Results of the Past and the Problems of the Present Plus.* 2025;14(2):71–76. (In Russ.) EDN SCSZTT

Информация об авторах / Information about the Authors

Танцеров Александр Хабибуллоевич,
аспирант кафедры программирования,
Пензенский государственный технологический
институт, г. Пенза, Российская Федерация,
e-mail: alex.tancerov@mail.ru,
Researcher ID: O-0537-2025,
ORCID: 0009-0006-7695-0514

Alexander K. Tantserov, Postgraduate
at the Department of Programming,
Penza State Technological Institute,
Penza, Russian Federation,
e-mail: alex.tancerov@mail.ru,
Researcher ID: O-0537-2025,
ORCID: 0000-0003-4114-7036

Данилов Евгений Александрович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры программирования, Пензенский
государственный технологический институт,
г. Пенза, Российская Федерация,
e-mail: danilov@penzgtu.ru,
Researcher ID: OUI-0415-2025,
ORCID: 0000-0003-4114-7036

Evgeny A. Danilov, Candidate of Sciences
(Engineering), Associate Professor
at the Department of Programming,
Penza State Technological Institute,
Penza, Russian Federation,
e-mail: danilov@penzgtu.ru,
Researcher ID: OUI-0415-2025,
ORCID: 0000-0003-4114-7036

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ

SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-162-174>



УДК 519.816

Система поддержки принятия врачебных решений в трансплантологии при подборе реципиентов для пересадки донорских органов

Е. Н. Галушина¹, П. В. Галушин²✉, К. А. Гильдеева³

¹ Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого
Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. Партизана Железняка, д. 1, г. Красноярск 660022, Российская Федерация

² Сибирский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации
ул. Рокоссовского, д. 20, г. Красноярск 660131, Российская Федерация

³ Краевая клиническая больница
ул. Партизана Железняка, д. 3А, г. Красноярск 660022, Российская Федерация

✉ e-mail: galushin.pv@yandex.ru

Резюме

Цель исследования заключается в разработке системы поддержки принятия врачебных решений при подборе реципиентов для пересадки органов, позволяющей автоматизировать выполнение виртуальной перекрестной пробы и оценить тканевую совместимость по уже известным лабораторным данным, снизив таким образом когнитивную и эмоциональную нагрузку на врачей и уменьшив вероятность ошибок.

Методы. При разработке описанной системы поддержки принятия врачебных решений использовались методы системного анализа, методы проектирования программных средств информационных систем, системы управления базами данных LibreOffice Base, языки программирования Python, SQL, Basic.

Результаты. В ходе выполнения исследования была спроектирована и разработана система поддержки принятия врачебных решений в трансплантологии, автоматизирующая процесс подбора реципиентов для пересадки донора с учётом различных факторов совместимости, подготовку отчётов в требуемом формате. Ядром системы является база данных, содержащая сведения о реципиентах и донорах. Система не только автоматически определяет параметры совместимости реципиентов и доноров, но и ранжирует их по степени совместимости. Описанная система внедрена в деятельность отдела иммунотипирования Краевого государственного бюджетного учреждения здравоохранения «Краевая клиническая больница» (г. Красноярск). Результаты опытной эксплуатации показали, что система соответствует всем функциональным требованиям. Автоматизация рутинных операций позволила врачам сократить время на принятия решений, уменьшив вероятность ошибок.

© Галушина Е. Н., Галушин П. В., Гильдеева К. А., 2025

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление,
вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025;15(4):162–174

Заключение. Разработана система поддержки принятия врачебных решений в трансплантологии при подборе реципиентов для пересадки донорских органов. Данная система автоматизирует процесс ранжирования реципиентов по степени совместимости с донорским органом и другим факторам, подготовку различных отчётов, что уменьшает когнитивную нагрузку на врача и позволяет уменьшить вероятность ошибок при подборе реципиентов, а также в целом уменьшает объём рутинной работы.

Ключевые слова: трансплантология; пересадка органов; система поддержки принятия врачебных решений; база данных.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Галушина Е. Н., Галушин П. В., Гильдеева К. А. Система поддержки принятия врачебных решений в трансплантологии при подборе реципиентов для пересадки донорских органов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 4. С. 162–174. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-162-174>

Поступила в редакцию 16.10.2025

Подписана в печать 15.11.2025

Опубликована 26.12.2025

Medical decision support system in transplantology for selecting donor organ transplantation recipients

Elena N. Galushina¹, Pavel V. Galushin²✉, Karina A. Gildeeva³

¹ Krasnoyarsk State Medical University named after Professor V. F. Voyno-Yasenetsky of the Ministry of Health of the Russian Federation
1 Partizana Zheleznyaka Str., Krasnoyarsk 660022, Russian Federation

² Siberian Law Institute of Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation
20 Rokossovsky Str., Krasnoyarsk 660131, Russian Federation

³ Regional Clinical Hospital
3A Partizana Zheleznyaka Str., Krasnoyarsk 660022, Russian Federation

✉ e-mail: galushin.pv@yandex.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop a system to support medical decision-making in the selection of organ transplant recipients, which makes it possible to automate the implementation of a virtual cross-sample and assess tissue compatibility based on already known laboratory data, thus reducing the cognitive and emotional burden on doctors and reducing the likelihood of errors.

Methods. In developing the described medical decision support system, methods of system analysis, methods of designing software for information systems, LibreOffice Base database management systems, Python, SQL, Basic programming languages were used.

Results. In the course of the study, a system to medical medical decision support system in transplantology was designed and developed, automating the process of selecting recipients for donor transplantation taking into account various compatibility factors, and preparing reports in the required format. The core of the system is a database containing information about recipients and donors. The system not only automatically determines the compatibility parameters of recipients and donors, but also ranks them by the degree of compatibility. The described system has been implemented in the activities of the Immunotyping Department of the Regional State Budgetary Healthcare Institution "Regional Clinical Hospital", Krasnoyarsk. The results of the pilot operation showed that the system meets all functional requirements. Automation of routine operations allowed doctors to reduce the time for decision-making and reduce the likelihood of errors.

Conclusion. A medical decision support system in transplantology when selecting recipients for donor organ transplantation has been developed. This system automates the process of ranking recipients by the degree of compatibility with the donor organ and other factors, preparing various reports, which reduces the cognitive load on the doctor and reduces the likelihood of errors in the selection of recipients, and generally reduces the volume of routine work.

Keywords: transplantology; organ transplantation; medical decision support system; database.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Galushina E.N., Galushin P.V., Gildeeva K.A. Medical decision support system in transplantology for selecting donor organ transplantation recipients. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(4):162–174. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-162-174>

Received 16.10.2025

Accepted 15.11.2025

Published 26.12.2025

Введение

Трансплантология является отраслью медицины, в которой сочетаются передовые научные достижения и сохраняющиеся объективные проблемы. Несмотря на то, что количество проводимых трансплантаций выросло [1], сохраняется дефицит донорских органов – выполняемые операции покрывают примерно 10% общемировой потребности [2]. Наиболее распространена трансплантация донорской печени [3], почек [4] и сердца [5].

При этом врачи в данной сфере работают в стрессовых условиях: появление нового донора часто не прогнозируется и может происходить в любое время суток, а выбор реципиента, подготовка и выполнение операции должны производиться очень оперативно.

Цель настоящего исследования заключается в разработке системы поддержки принятия врачебных решений при подборе реципиентов для пересадки органов, позволяющей автоматизировать выполнение виртуальной перекрестной пробы и оценить тканевую совместимость по уже известным лабораторным

данным, снизив таким образом когнитивную и эмоциональную нагрузку на врачей и уменьшив вероятность ошибок.

Материалы и методы

Системы управления базами данных и системы поддержки принятия решений достаточно широко используются в здравоохранении [6]. Они применяются, в частности, для генерации баз знаний систем поддержки принятия врачебных решений (далее также – СППВР) по управлению процессом лечения в целом [7], при назначении лечения [8], в травматологии ортопедии [9], в кардиологии [10] и трансплантологии [11].

В рамках данной статьи рассматриваются проектирование и разработка системы поддержки принятия врачебных решений врача-трансплантолога при подборе доноров для пересадки органов. Рассмотрим стек информационных технологий, используемых для достижения этой цели.

В основу разрабатываемой СППВР было решено положить базу данных, так как для функционирования указанной системы необходимо хранение информации о реципиентах и донорах. В

качестве системы управления базами данных была выбрана LibreOffice Base [12], входящая в офисный пакет LibreOffice [13]. Данный офисный пакет является бесплатным и распространяется с российской операционной системой Astra Linux [14]. При этом он не привязан к конкретной операционной системе и поддерживается на множестве платформ, включая Microsoft Windows, macOS и различные варианты GNU/Linux. Всё сказанное означает, что LibreOffice является удачным выбором для использования в отечественных информационных системах в текущих внешнеполитических условиях и в рамках курса на импортозамещение программного обеспечения [15].

Анализ требований к алгоритму определения реципиентов, которым орган донора подходит в наибольшей степени, показал, что его невозможно элегантно выразить с помощью стандартных инструментов для конструирования запросов и отчётов, входящих в инструменты проектирования и администрирования баз данных, или на языке SQL [16]. То же относится и к формированию отчётов, соответствующих потребностям и сложившимся практикам медицинских организаций, в частности отдела иммунотипирования КГБУЗ «Краевая клиническая больница» Красноярского края.

Для преодоления указанных трудностей были использованы возможности LibreOffice по использованию скриптов (макросов). LibreOffice поддерживает создание макросов на языках

программирования Basic, BeanShell (интерпретируемая версия Java), Python и JavaScript [17]. Авторами из этих вариантов был выбран язык программирования Python. Данный язык является де-факто стандартом для анализа данных [18] и одним из самых популярных языков программирования вообще. Кроме того, язык программирования Python допускает вызов функций языка программирования C, который, с свою очередь, имеет интерфейсы с многими другими широко распространёнными языками программирования.

Следует подчеркнуть, что использование макросов на языках программирования общего назначения не заменяет, а дополняет использование традиционного для систем управления базами данных языка запросов SQL: язык общего назначения может использоваться для построения запросов на языке SQL, которые выполняются ядром базы данных.

Для работы с документами из макросов на языке программирования Python используется библиотека Script-forge¹. Макросы были использованы для выражения сложных условий фильтрации, сортировки и формирования отчёта в виде HTML-файла, которые затем отображаются для пользователя с использованием используемого в операционной системе веб-браузера.

Таблицы из HTML-документа могут быть скопированы в распространённые редакторы электронных таблиц, такие как Microsoft Office Excel и LibreOffice Calc, либо распечатаны на принтере.

¹ The ScriptForge Library // The LibreOffice Help Window. URL: https://help.libreoffice.org/latest/en-US/text/sbasic/shared/03/lib_ScriptForge.html (дата обращения: 20.09.2025).

Результаты и их обсуждение

Система поддержки принятия решений врача-трансплантолога при подборе доноров для пересадки органов предназначена для агрегации, хранения и обработки данных о донорах и пациентах, нуждающихся в пересадке органов, а также для поиска наилучших соответствий пациентов и доноров.

Формализация и автоматизация соответствующих процессов позволяет снизить вероятность ошибок, сократить время подготовки отчётов и поиска реципиентов, которым подойдут органы донора.

В частности, во всех случаях, когда множество возможных значений некоторого поля известно заранее (группа крови, орган), предусматривается выбор

значения из списка, а не его ручной ввод. Такой подход полностью исключает опечатки, а значит, и возможность того, что, например, реципиент не будет рассмотрен для пересадки из-за того, что у него название органа написано не так, как у донора.

Основой системы поддержки принятия врачебных решений и базы данных, лежащей в её основе, являются две таблицы: «Доноры» и «Реципиенты». Прямой доступ пользователей к этим таблицам не предполагается, все изменения производятся через формы, чтобы уменьшить вероятность внесения ошибочных данных и удаления важной и актуальной информации. После запуска системы на экране отображается стартовая форма (рис. 1).



Рис. 1. Основная форма системы поддержки принятия решений

Fig. 1. Main form of decision support system

Данная форма содержит кнопки, соответствующие основным процедурам, которые выполняет пользователь. Эти кнопки открывают формы для работы со списками доноров и реципиентов, подбора наиболее подходящих реципиентов для конкретного донора. Кроме того, с этой формы с помощью соответству-

ющих кнопок можно открыть руководство пользователя и окно с информацией о программе и её разработчиках.

Рассмотрим форму для работы с реципиентами (рис. 2). Основную часть окна занимает таблица с данными реципиентов. В верхней части окна находятся поля фильтров по

имени реципиента, группе крови, органу для пересадки и статусу реципиента. Для группы крови, органа для пересадки и статуса предусмотрены выпадающие списки, содержащие

возможные варианты соответствующего поля. В основной части окна отображаются только те реципиенты, данные которых соответствуют фильтрам.

ФИО реципиента		Группа крови		Орган для пересадки		Статус						
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="button" value="▼"/>	<input type="button" value="▼"/>	<input type="button" value="▼"/>	<input type="button" value="▼"/>	<input type="button" value="В ожидании"/>						
ID реципиента	ФИО реципиента	Дата рождения	Группа крови	Rh	Орган для пересадки	Дата постановки	HLA_A	HLA_B	HLA_Bw	HLA_C	HLA_DRB1	HLA_DQA
11 Криндаль Александр 11.11.91	0()	02:33	07:14								08:13	
12 Рец2	10.01.05	0()	11:33	14:35							01:01	
13 Рец3	07.01.95	0()	01:24	18:40	6	01:03					12:13	01:05
14 Рец5	10.01.05	A(II)	02:32	35:57							07:13	
16 Реципиент08.01.2025	08.01.05	A(II)	01:01	02:16	4	03:03						
18 Реципиент10.01.25	10.01.85	B(III)	01:01	02:02		03:13						
19 Аверченко Е.В.	01.01.75	0()	5:17	4								
20 Хильев Андрей Иван	12.01.25	0()	01:03	07:08							01:11	
21 Морозов Александр	15.04.85	0()	02:02	38:40	4:6	03:12					11:13	01:05
22 Петров Александр И.	23.01.76	0()	30:31	13:40							08:14	
23 Наумова Светлана Ге	15.06.07	0()	02:58	15:44							09:11	
24 Якимов Валентин Ан.	30.05.77	0()	01:30	08:13							03:07	
25 Усмонова Тамара Бор	03.02.62	0()	03:31	35:35	6	04:04					01:04	01:03
26 Криндаль Александр	11.11.91	0()	02:33	07:14							08:13	
<Автополе>												
Запись 1 из 14												
<input type="button" value="Ввод нового реципиента"/>		<input type="button" value="Печать"/>										

Рис. 2. Форма для работы с реципиентами

Fig. 2. Recipients management form

При нажатии на кнопку «Печать» в браузере открывается HTML-представление этого списка.

Форма для работы с донорами показана ниже (рис. 3). После открытия формы данные в ней не могут быть изменены, а после нажатия на кнопку

«Редактировать данные» форма переходит в режим редактирования, становятся активными кнопки «Удалить выбранную запись», «Сохранить изменения», «Ввод нового донора», а текст кнопки меняется на «Завершить редактирование».

ID донора	ФИО донора	ABO	Rh	Орган для пересадки	Дата поступления	A	B	Bw	C	DRB1	DQA1	DQ81
10 Донор17.01.25	0()	Отриц печень	17.01.25	02:13 13:14 4	02							
11 Лавриненко О.В.	0()	Пол почка	17.01.25	01:01 01:02		03:03						
8 Донор10.01.2025	A(II)	Полож печень	10.01.25	02:04 04:05 4:6		03:06						
7 Донор10.01.2025	AB(IV)	Полож печень	10.01.25	03:15 15:17 6	01:01		05					
3 Донор07.01.25	B(III)	Полож печень	07.01.25	01:13 02:45 6		03:05						
6 Иванова И.И.	0()	Полож почка	06.01.25	02:13 13:14	12:15							
0 Донор03.01.2025	AB(IV)	печень	01.01.25	02:13 01:02		04:18						
2 Донор26.11.24	A(II)	Полож сердце	26.11.24	01:02 08:27 4:6	02:07 14:16	01:05		03:05				
9 Донор28.10.2024	0()	Полож почка	28.10.24	02:25 07:18 6	07:12 04:13	01:03		02:06				
1 Донор1	AB(IV)	печень		01:02 27:40								
Запись 1 из 10												
<input type="button" value="Ввод нового донора"/>		<input type="button" value="Редактировать данные"/>										

Рис. 3. Форма для работы с донорами

Fig. 3. Donors management form

Рассмотрим алгоритм подготовки данных при подборе реципиентов для выбранного донора. При описании алгоритма под «генотипом» для удобства будут пониматься гены, кодирующие систему тканевой совместимости человека (англ. HLA, Human Leukocyte Antigens, человеческие лейкоцитарные антигены) [19], т. е. только та часть генотипа человека, которая имеет значение для принятия решения о трансплантации. Наиболее значимые локусы при развитии реакции отторжения трансплантата: HLA-A, B, C (1-й класс) и HLA-DRB1, DQA1, DQB1 (2-й класс).

После того как стал известен генотип донора (путем HLA-типирования), формируется список претендентов на пересадку из «листа ожидания». В данный список попадают только те, кто имеет идентичную с донором группу крови и статус «В ожидании».

Для каждого потенциального реципиента алгоритм проводит виртуальный кросс-матч: сопоставляет генотип донора с HLA-антителами I и II классов реципиента и ищет совпадения. Данный алгоритм вычисляет не только наличие совпадения, но и указывает конкретные антитела и их количество. Эти данные отображаются в отчетах, а также используются для сортировки пациентов.

Сортировка потенциальных реципиентов осуществляется по нескольким критериям: количество совпавших антител против генотипа донора (по возрастанию), процента панель-реактивных антител (по убыванию) и количеству совпадений между генотипами донора и реципиента (по убыванию).

Обоснованием такого порядка сортировки являются следующие соображения. При выявлении антидонорских

антител виртуальный кросс-матч считается положительным, что говорит об абсолютном противопоказании к трансплантации почки [20], так как с большой вероятностью будет сверхострое отторжение трансплантата. В случае пересадки печени и сердца кандидаты с положительной реакцией могут быть рассмотрены, но важно знать количество антител, чтобы правильно подобрать иммunoспрессивную терапию.

Процент панель-реактивных антител (PRA) показывает процент возможных доноров (из общей популяции), против которых у реципиента присутствуют HLA-антитела [21]. Таким образом, у пациентов с высоким процентом PRA мало шансов найти донора, к органу которого не будет отторжения, а значит, если подходящий донор нашёлся, то этой возможностью целесообразно воспользоваться.

Наконец, чем больше совпадений по генотипу между донором и реципиентом, тем лучше потенциальная совместимость их органов. При этом различия в генотипе означают потенциальные проблемы с совместимостью, а наличие у реципиента антител – это уже реальная несовместимость. При трансплантации иммунитет реципиента реагирует на все антигены донора, отличные от своих, поэтому важно знать количество совпавших антигенов для назначения верной иммunoспрессивной терапии [22], так как это может существенно повлиять на качество жизни пациента [23].

Пример формы с результатами выполнения описанного алгоритма показан ниже (рис. 4). В верхней части формы отображаются данные о доноре, а ниже – ранжированная таблица потенциальных реципиентов. Ещё ниже расположена

кнопка «Сформировать отчёт», при нажатии на которую в браузере, используемом в операционной системе по умолчанию, будет открыт отчёт в

формате HTML, соответствующий форматам документов, принятых в медицинской организации.

ФИО донора	HLA донора	Группа крови	Орган для пересадки
Донор26.11.24	A*01:02 B*08:27 Bw*4;6 C*02:07 DR*14:16 DQA*01:05 DQB*03:05	A(II)	сердце

ФИО реципиента	HLA реципиента	Совпадения HLA	Число совпадений по HLA	A T I класса	Совпадения по A T 1 класса	A T II класса	Совпадения по A T II класса
Рец2	A*11;33 B*14;35	Отр	0	Отр	Отр	Отр	Отр
Реципиент08.01.2025	A*01;01 B*02;16	A*01	1	A*01	A*01	DQA*03;05	DQA*05
Рец5	A*02;32 B*35;57	A*02	1	Отр	Отр	DQA*05	DQA*05 DQB*03

Запись 1 из 3 < > < > < >

Сформировать отчёт

Рис. 4. Форма со списком потенциальных реципиентов

Fig. 4. Form with a potential recipients list

Для HTML-отчёта реципиенты разбиваются на две группы: без антител к антигенам донора (отрицательный результат) и с наличием таких антител (положительный результат). Внутри

каждой группы производится описанная выше сортировка. На рисунке 5 показан пример соответствующего отчёта. В столбце HLA совпадения для удобства врача выделяются полужирным.

КГБУЗ ККБ КДЛ Отдел иммунотипирования

Донор					
Донор26.11.24	A*01:02 B*08:27 Bw*4;6 C*02:07 DR*14:16 DQA*01:05 DQB*03:05				
Отрицательный результат					
№	ФИО	Возраст	Виртуальный кросс матч	ЛЦТТ	HLA
1	Рец2	20	Класс I Отр Класс II Отр	Отр	A*11;33 B*14;35 DR*01;01
Положительный результат					
№	ФИО	Возраст	Виртуальный кросс матч	ЛЦТТ	HLA
1	Рец5	20	Класс I Отр Класс II DQA*05 DQB*03	Отр	A*02;32 B*35;57 DR*07;13
2	Реципиент08.01.2025	20	Класс I A*01 Класс II DQA*05	Пол	A*01;01 B*02;16 C*03;03

Отчёт создан: 11.02.2025 14:49

Рис. 5. Пример отчёта о совместимости реципиентов и донора в формате HTML

Fig. 5. Example of recipient and donor compatibility report in HTML format

Выводы

В ходе выполнения настоящего исследования была разработана система поддержки принятия врачебных решений в

трансплантологии при подборе реципиентов для пересадки донорских органов. Данная система позволяет вести учёт реципиентов и доноров, автоматизирует

процесс ранжирования реципиентов по степени совместимости с донорским органом и другим факторам, подготовку различных отчётов, что уменьшает

когнитивную нагрузку на врача и позволяет уменьшить вероятность ошибок при подборе реципиентов, а также в целом уменьшает объём рутинной работы.

Список литературы

1. Готье С. В., Хомяков С. М. Донорство и трансплантация органов в Российской Федерации в 2023 году. XVI сообщение регистра Российского трансплантоматического общества // Вестник трансплантоматологии и искусственных органов. 2024. Т. 26, № 3. С. 8-31. <https://doi.org/10.15825/1995-1191-2024-3-8-31>
2. Силуянова Ю. А. Борьба с торговлей детьми в России: поиски решения проблемы // Государственное управление. Электронный вестник. 2020. № 81. С. 272–296.
3. Минина М. Г., Воронов Д. В., Тенчурина Э. А. Эволюция донорства печени в Москве // Вестник трансплантоматологии и искусственных органов. 2022. Т. 24, № 3. С. 102–110. <https://doi.org/10.15825/1995-1191-2022-3-102-110>
4. Клинический случай успешной аллотрансплантации почки больной с несекретирующей множественной миеломой с сопутствующим почечным поражением / Е. В. Уткина, Н. В. Фомина, Д. О. Груздев, А. Н. Кисилева, Л. Д. Чеснокова // Сибирское медицинское обозрение. 2024. № 6(150). С. 102–107.
5. Факторы риска смерти больных, находящихся в листе ожидания трансплантации сердца / П. А. Федотов, М. А. Симоненко, Ю. В. Сазонова, М. А. Борцова, А. Н. Костомаров, М. А. Федорова, А. Е. Баутин, Г. В. Николаев, М. Л. Гордеев, М. А. Карпенко, Т. М. Первунина, М. Ю. Ситникова // Южно-Российский журнал терапевтической практики. 2022. Т. 3, № 2. С. 41–54. <https://doi.org/10.21886/2712-8156-2022-3-2-41-54>
6. Мировые тренды цифровой трансформации отрасли здравоохранения / П. С. Пугачев, А. В. Гусев, О. С. Кобякова, Ф. Н. Кадыров, Д. В. Гаврилов, Р. Э. Новицкий, А. В. Владимирический // Национальное здравоохранение. 2021. Т. 2, № 2. С. 5–12. <https://doi.org/10.47093/2713-069X.2021.2.2.5-12>
7. Генерация базы знаний для создания системы поддержки принятия врачебных решений по управлению процессом лечения / Е. А. Бородулина, В. В. Грибова, Д. Б. Окунь, Е. П. Еременко, Б. Е. Бородулин, Р. И. Ковалёв, Е. С. Вдоушкина, Е. А. Амосова // Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины. 2024. Т. 39, № 2. С. 209–217. <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2024-39-2-209-217>
8. Серобабов А. С., Денисова Л. А., Серобабова А. Л. Разработка системы поддержки принятия врачебных решений при назначении лечения пациенту // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 9. С. 321–325.
9. Разработка системы поддержки принятия врачебных решений в травматологии и ортопедии. Биомеханика как инструмент предоперационного планирования / А. С. Бескровный, Л. В. Бессонов, А. А. Голядкина, А. В. Доль, Д. В. Иванов, И. В. Кириллова, Л. Ю. Коссович, Д. А. Сидоренко // Российский журнал биомеханики. 2021. Т. 25, № 2. С. 118–133.

10. Фролов С. В., Коробов А. А., Ветров А. Н. Система поддержки принятия врачебных решений в кардиологии на основе цифрового двойника сердечно-сосудистой системы // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2023. Т. 11, № 1 (40). С. 3–4. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.40.1.007>
11. Сравнительный анализ моделей, прогнозирующих риски раннего неблагоприятного исхода трансплантации печени от посмертного донора: ретроспективное одноцентровое исследование / А. И. Сушков, М. В. Попов, В. С. Рудаков, Д. С. Светлакова, А. Н. Пашков, А. С. Лукьянчикова, М. Муктаржан, К. К. Губарев, В. Е. Сюткин, А. И. Артемьев, С. Э. Восканян // Трансплантология. 2023. Т. 15, № 3. С. 312–333. <https://doi.org/10.23873/2074-0506-2023-15-3-312-333>
12. Маркевич Д. В., Хомоненко А. Д., Ермаков С. Г. От FOXPRO к POSTGRESQL: оптимизация, эффективное управление данными и генерация отчетов // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2024. Т. 16, № 1. С. 21-30. <https://doi.org/10.36724/2409-5419-2024-16-1-21-30>
13. Орлова И. В. Использование свободного программного обеспечения для эконометрического моделирования // Фундаментальные исследования. 2023. № 1. С. 81-89. <https://doi.org/10.17513/fr.43424>
14. Баталин Р. Ю. Проблемы адаптации информационных систем и программного обеспечения под ОС Astra Linux // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 7. С. 140–142.
15. Байдаров Д. Ю., Абакумов Е. М., Файков Д. Ю. Программное обеспечение «тяжелого» класса: возможности импортозамещения // Вопросы инновационной экономики. 2022. Т. 12, № 1. С. 295–316. <https://doi.org/10.18334/vinec.12.1.114143>
16. SQL and NoSQL Database Software Architecture Performance Analysis and Assessments – A Systematic Literature Review / W. Khan, T. Kumar, Ch. Zhang, K. Raj, A. M. Roy, B. Luo // Big Data and Cognitive Computing. 2023. Vol. 7, N 2. P. 97. <https://doi.org/10.3390/bdcc7020097>
17. Антошкин В. А., Щербакова В. И. Использование JavaScript интерфейса прикладного программирования для управления NoSQL базой данных IndexedDB // Информатика и прикладная математика. 2021. № 27. С. 26–32.
18. Салтанаева Е. А., Эшелиоглу Р. И., Набиуллина Э. А. Перспективы развития использования языка программирования Python в оптимизации процессов обработки информации // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 10. С. 163–165.
19. Омарова Ф. А., Дроков М. Ю., Хамаганова Е. Г. Главный комплекс гистосовместимости: история открытия, эволюция, строение, значение при трансплантации аллогенных гемопоэтических стволовых клеток // Трансплантология. 2023. Т. 15, № 2. С. 251–265. <https://doi.org/10.23873/2074-0506-2023-15-2-251-265>
20. Леушина Е. А., Амаева Х. Р. Трансплантация в лечении хронической болезни почек // Вестник трансплантологии и искусственных органов. 2023. Т. 25, № 5. С. 128.
21. Роль лейкоцитарных антител при трансплантации органов. Обзор литературы / А. А. Турганбекова, С. А. Абдрахманова, Ж. Ж. Жанзакова, И. А. Пархоменко, К. Х. Жангизиева, С. Б. Саусакова // Вестник Казахского национального медицинского университета. 2022. № 4. С. 203–214. <https://doi.org/10.53065/x9722-5615-3571-n>

22. Влияние раннего назначения эверолимуса на фоне снижения дозирования ингибиторов кальциневрина на функцию почек у реципиентов трансплантата печени при длительном наблюдении / В. Е. Сюткин, А. А. Салиенко, О. Д. Олисов, С. В. Журавель, М. С. Новрузбеков // Трансплантология. 2021. Т. 13, № 2. С. 121–129. <https://doi.org/10.23873/2074-0506-2021-13-2-121-129>

23. Сравнение уровня качества жизни пациентов после трансплантации почки при различных схемах иммуносупрессивной терапии / Е. В. Парабина, О. В. Фатенков, Г. Н. Светлова, Н. Ю. Кувшинова // Лечащий врач. 2025. Т. 28, № 1. С. 26–31. <https://doi.org/10.51793/OS.2025.28.1.004>

References

1. Gauthier S.V., Khomyakov S.M. Organ donation and transplantation in the Russian Federation in 2023. XVI message of the register of the Russian Transplantation Society. *Vestnik transplantologii i iskusstvennyh organov = Bulletin of Transplantology and Artificial Organs*. 2024;26(3):8–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.15825/1995-1191-2024-3-8-31>
2. Siluyanova Yu.A. Combating child trafficking in Russia: searching for a solution to the problem. *Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyj vestnik = Public Administration. Electronic Bulletin*. 2020;(81):272–296. (In Russ.)
3. Minina M.G., Voronov D.V., Tenchurina E.A. Evolution of liver donation in Moscow. *Vestnik transplantologii i iskusstvennyh organov = Bulletin of Transplantology and Artificial Organs*. 2022;24(3):102–110. (In Russ.) <https://doi.org/10.15825/1995-1191-2022-3-102-110>
4. Utkina E.V., Fomina N.V., Gruzdev D.O., Kisileva A.N., Chesnokova L.D. Clinical case of successful kidney allotransplantation in a patient with non-secretory multiple myeloma with concomitant renal damage. *Sibirskoe medicinskoe obozrenie = Siberian Medical Review*. 2024;(6):102–107. (In Russ.)
5. Fedotov P.A., Simonenko M.A., Sazonova Yu.V., Bortsova M.A., Kostomarov A.N., Fedorova M.A., Bautin A.E., Nikolaev G.V., Gordeev M.L., Karpenko M.A., Pervunina T.M., Sitnikova M.Yu. Risk factors for death in patients on the waiting list for heart transplantation. *Yuzhno-Rossijskij zhurnal terapevticheskoy praktiki = South Russian Journal of Therapeutic Practice*. 2022;3(2):41–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.21886/2712-8156-2022-3-2-41-54>
6. Pugachev P.S., Gusev A.V., Kobyakova O.S., Kadyrov F.N., Gavrilov D.V., Novitsky R.E., Vladzimirsky A.V. World Trends in Digital Transformation of the Healthcare Industry. *Nacional'noe zdorovoohranenie = National Healthcare*. 2021;2(2):5–12. (In Russ.) <https://doi.org/10.47093/2713-069X.2021.2.2.5-12>
7. Borodulina E.A., Gribova V.V., Okun D.B., Eremenko E.P., Borodulin B.E., Kovalev R.I., Vdoushchina E.S., Amosova E.A. Generation of a knowledge base for creating a system for supporting medical decision-making for managing the treatment process. *Sibirskij zhurnal klinicheskoy i eksperimental'noj mediciny = Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine*. 2024;39(2):209–217. (In Russ.) <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2024-39-2-209-217>
8. Serobabov A.S., Denisova L.A., Serobabova A.L. Development of a system to support medical decision-making when prescribing treatment to a patient. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical Sciences*. 2023;(9):321–325. (In Russ.)

9. Beskrovny A.S., Bessonov L.V., Golyadkina A.A., Dol A.V., Ivanov D.V., Kirillova I.V., Kossovich L.Yu., Sidorenko D.A. Development of a system for supporting medical decision-making in traumatology and orthopedics. Biomechanics as a tool for preoperative planning. *Rossijskij zhurnal biomekhaniki = Russian Journal of Biomechanics*. 2021;25(2):118–133. (In Russ.)
10. Frolov S.V., Korobov A.A., Vetrov A.N. System for supporting medical decision-making in cardiology based on a digital twin of the cardiovascular system. *Modeling, optimization and Information Technology = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(1):3–4. (In Russ.) <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.40.1.007>
11. Sushkov A.I., Popov M.V., Rudakov V.S., Svetlakova D.S., Pashkov A.N., Lukyanchikova A.S., Muktarzhan M., Gubarev K.K., Syutkin V.E., Artemyev A.I., Voskanyan S.E. Comparative analysis of models predicting the risks of early adverse outcome of liver transplantation from a deceased donor: a retrospective single-center study. *Transplantologiya = Transplantology*. 2023;15(3):312–333. (In Russ.) <https://doi.org/10.23873/2074-0506-2023-15-3-312-333>
12. Markevich D.V., Khomenko A.D., Ermakov S.G. From FOXPRO to POSTGRESQL: optimization, efficient data management, and report generation. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyah Zemli = Science-Intensive Technologies in Space Research of the Earth*. 2024;16(1):21–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.36724/2409-5419-2024-16-1-21-30>
13. Orlova I.V. Using free software for econometric modeling. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*. 2023;(1):81–89. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/fr.43424>
14. Batalin R.Yu. Problems of Adaptation of Information Systems and Software to Astra Linux OS. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*. 2024;7:140–142. (In Russ.)
15. Baidarov D.Yu., Abakumov E.M., Faikov D.Yu. "Heavy" class software: import substitution possibilities. *Voprosy innovacionnoj ekonomiki = Issues of Innovative Economics*. 2022;12(1):295–316. (In Russ.) <https://doi.org/10.18334/vinec.12.1.114143>
16. Khan W., Kumar T., Zhang Ch., Raj K., Roy A.M., Luo B. SQL and NoSQL Database Software Architecture Performance Analysis and Assessments – A Systematic Literature Review. *Big Data and Cognitive Computing*. 2023;7(2):97. <https://doi.org/10.3390/bdcc7020097>
17. Antoshkin V.A., Shcherbakova V.I. Using JavaScript API to manage NoSQL database "IndexedDB". *Informatika i prikladnaya matematika = Computer Science and Applied Mathematics*. 2021;(27):26–32. (In Russ.)
18. Saltanaeva E.A., Eshelioglu R.I., Nabiullina E.A. Prospects for the development of the use of the python programming language in optimizing information processing processes. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*. 2023;(10):163–165. (In Russ.)
19. Omarova F.A., Drokov M.Yu., Khamaganova E.G. Major histocompatibility complex: history of discovery, evolution, structure, significance in transplantation of allogeneic hematopoietic stem cells. *Transplantologiya = Transplantology*. 2023;15(2):251–265. (In Russ.) <https://doi.org/10.23873/2074-0506-2023-15-2-251-265>
20. Leushina E.A., Amaeva H.R. Transplantation in the treatment of chronic kidney disease. *Vestnik transplantologii i iskusstvennyh organov = Bulletin of Transplantology and Artificial Organs*. 2023;25(S):128. (In Russ.)

21. Turganbekova A.A., Abdrukhmanova S.A., Zhanzakova Zh.Zh., Parkhomenko I.A., Zhangazieva K.Kh., Sausakova S.B. The role of leukocyte antibodies in organ transplantation. Literature review. *Vestnik Kazahskogo naciona'l'nogo medicinskogo universiteta = Bulletin of the Kazakh National Medical University*. 2022;(4):203–214. (In Russ.) <https://doi.org/10.53065/x9722-5615-3571-n>
22. Syutkin V.E., Salienko A.A., Olisov O.D., Zhuravel S.V., Novruzbekov M.S. The effect of early administration of everolimus against the background of a decrease in the dosage of calcineurin inhibitors on renal function in liver transplant recipients during long-term follow-up. *Transplantologiya = Transplantology*. 2021;13(2):121–129. (In Russ.) <https://doi.org/10.23873/2074-0506-2021-13-2-121-129>
23. Parabina E.V., Fatenkov O.V., Svetlova G.N., Kuvshinova N.Yu. Comparison of the quality of life of patients after kidney transplantation with various immunosuppressive therapy regimens. *Lechashchij vrach = Attending Physician*. 2025;28(1):26–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.51793/OS.2025.28.1.004>

Информация об авторах / Information about the Authors

Галушина Елена Николаевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской кибернетики и информатики, Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Красноярск, Российская Федерация, e-mail: e.n.galushina@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5628-0078

Галушин Павел Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-правовых дисциплин и специальной техники, Сибирский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, г. Красноярск, Российская Федерация, e-mail: galushin.pv@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8270-9560

Гильдеева Карина Андреевна, врач клинической лабораторной диагностики, Краевая клиническая больница, г. Красноярск, Российская Федерация, e-mail: karinusyagil@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1260-5790

Elena N. Galushina, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor at the Department of Medical Cybernetics and Informatics, Krasnoyarsk State Medical University named after Professor V. F. Voyno-Yasenetsky of the Ministry of Health of the Russian Federation, Krasnoyarsk Russian Federation, e-mail: e.n.galushina@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5628-0078

Pavel V. Galushin, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor at the Department of Information and Legal Disciplines and Special Technology, Siberian Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: galushin.pv@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8270-9560

Karina A. Gildeeva, Doctor of Clinical Laboratory Diagnostics, Regional Clinical Hospital, Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: karinusyagil@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1260-5790

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-175-191>



УДК 004.3.621.372

Применение методологии тензорного и кластерного анализа для моделирования процессов функционального состояния объектов критической информационной инфраструктуры в условиях деструктивных электромагнитных воздействий

А. А. Двиллянский¹ 

¹ МИРЭА – Российский технологический университет
пр-т Вернадского, д. 78, г. Москва 119454, Российская Федерация

 e-mail: dvilyanskiy@mirea.ru

Резюме

Цель исследования заключается в обосновании возможности использования методологии тензорного и кластерного анализа для моделирования процессов, связанных с оценкой функционального состояния объектов критической информационной инфраструктуры в условиях деструктивных электромагнитных воздействий, вызывающих функциональное поражение микроэлектронной компонентной базы средств обработки информации (маршрутизаторов, средств управления, вычислительной техники и мониторинга) критической информационной инфраструктуры.

Методы. Использованы системный подход для моделирования процессов, а также методы тензорного и кластерного анализа в рамках оценки функционального состояния объектов критической информационной инфраструктуры в условиях деструктивных воздействий. Интеграция указанных подходов позволяет оптимизировать параметры сетей и узлов связи, а также повысить их устойчивость к неблагоприятным деструктивным воздействиям.

Результаты. Разработана математическая модель для описания состояния критически важной информационной инфраструктуры, базирующаяся на принципах тензорного и кластерного анализа, а также на иерархической процедуре «деградации критической информационной инфраструктуры поглощением» в условиях деструктивного электромагнитного воздействия. Предложенная модель предназначена для формирования и внедрения решающих правил, направленных на обеспечение устойчивости функционирования критически важных информационных систем.

Заключение. На основании проведенного исследования доказана возможность применения тензорного и кластерного анализа к моделированию процессов, связанных с оценкой функционального состояния объектов критической информационной инфраструктуры, находящихся в условиях деструктивных электромагнитных воздействий и иерархической процедуры «деградации критической информационной инфраструктуры поглощением» с формулировкой и выполнением решающих правил в ходе исследуемого процесса, что позволит в последующем применять разработанные модели и методы для повышения защищенности элементов объектов и критической информационной инфраструктуры от различных внешних деструктивных электромагнитных воздействий.

Ключевые слова: сети и узлы связи; критическая информационная инфраструктура; тензорная топология; симплекс; комплекс; полиэдральная структура; кластерный анализ.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Для цитирования: Двильянский А. А. Применение методологии тензорного и кластерного анализа для моделирования процессов функционального состояния объектов критической информационной инфраструктуры в условиях деструктивных электромагнитных воздействий // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 4. С. 175–191. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-175-191>

Поступила в редакцию 16.10.2025

Подписана в печать 15.11.2025

Опубликована 26.12.2025

Application of tensor methodology and cluster analysis in modeling processes related to the assessment of the functional state of critical information infrastructure objects under destructive electromagnetic impacts

Alexey A. Dvilianskiy¹ 

¹ MIREA – Russian Technological University
78 Vernadsky Ave., Moscow 119454, Russian Federation

 e-mail: dvilyanskiy@mirea.ru

Abstract

The purpose of the research is to substantiate the possibility of using the tensor and cluster analysis methodology to simulate the processes associated with the assessment of the functional state of critical information infrastructure (CII) objects in conditions of destructive electro-magnetic influences that cause functional damage to the microelectronic component of the information processing tools (routers, controls, computer equipment and monitoring) critical information infrastructure.

Methods. A systematic approach was used to model processes, as well as methods of tensor and cluster analysis in the framework of assessing the functional state of objects of critical information infrastructure in conditions of destructive effects. The integration of these approaches makes it possible to optimize the parameters of networks and communication nodes, as well as to increase their resistance to non-smooth destructive effects.

Results. A mathematical model has been developed to describe the state of the critical information infrastructure, based on the principles of tensor and cluster analysis, as well as on the hierarchical procedure for "degradation of the critical information infrastructure by watering" under conditions of destructive electromagnetic exposure. The proposed model is intended for the formation and implementation of decisive rules aimed at ensuring the stable functioning of critical information systems.

Conclusion. Based on the study, the possibility of applying tensor and cluster analysis to process modeling was proved related to the assessment of the functional state of critical information infrastructure objects under conditions of destructive electromagnetic influences and the hierarchical procedure of "degradation of critical information infrastructure by absorption" with the formulation and implementation of decisive rules during the investigated process, that will make it possible to subsequently apply the developed models and methods to increase protection of object elements and critical information infrastructure from individual external destructive electromagnetic effects.

Keywords: networks and communication nodes; critical information infrastructure; tensor topology; simplex; complex; polyhedral structure; cluster analysis.

Conflict of interest: The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

For citation: Dvilianskiy A.A. Application of tensor methodology and cluster analysis in modeling processes related to the assessment of the functional state of critical information infrastructure objects under destructive electromagnetic impacts. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(4):175–191. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-175-191>

Received 16.10.2025

Accepted 15.11.2025

Published 26.12.2025

Введение

Формальное описание состояния критической информационной инфраструктуры и её объектов при деструктивном электромагнитном воздействии с использованием математических методов может быть получено путем формирования полной или хотя бы достоверной группы состояний системы с учётом множества качественных информационных параметров элементов управления информационным процессом и процессом защиты с определением полной совокупности состояний, в которых может находиться система, а также связи между ними, что позволит повысить достоверность результатов данной оценки, включающей:

– определения понятия «состояние объектов», а также причины и события, вызывающие его изменение [1];

– классификацию состояний, понятие степени их различимости;

– обоснование конечности множества состояний системы и ее элементов [2].

На настоящий момент существует множество определений понятия «состояние» [3]:

– состояние как понятие, обозначающее множество устойчивых (стабильных) значений переменных параметров (свойств) конкретного объекта. Состояние устойчиво до тех пор, пока над объектом не будет произведено действие; если над объектом будет произведено некоторое действие, его состояние может измениться. Последовательная смена состояний объекта называется процессом;

– состояние как абстрактный термин и категория научного познания, характеризующая способность движущейся материи к проявлению в различных формах с присущими им существенными свойствами и отношениями природных объектов и систем, – качественная и количественная характеристика множества их функциональных и интегративных реальных и потенциальных возможностей, множества их признаков, параметров в пространстве и времени.

Что касается понятия совокупности состояний объектов КИИ, находящихся в условиях деструктивных воздействий, то здесь необходимо в дополнение ко всему дифференцировать объекты на

модули, входящие в них, изучить отношения между ними, общесистемные, внутренние и внешние факторы, в рамках исследуемой задачи – деструктивное воздействие, влияющее на её функциональное состояние [3]. Если в модуле выделить часть его структуры, то ни эта часть, ни оставшиеся части не могут самостоятельно реализовать некоторую завершенную информационную функцию. Каждый модуль вступает в отношения с другими модулями через открытые интерфейсы, определяемые на всех уровнях информационного взаимодействия.

Материалы и методы

Математическая модель состояния информационной системы, находящейся под деструктивным воздействием

Каждый ресурс информационной системы (ИС) (информационно-вычислительные комплексы (ИВК), сети и системы, средства и системы связи и передачи данных (СПД), системы управления (СУ)) в любой момент времени t_v^H характеризуется *состоянием*, для которого известен способ оценки его влияния на целостность информации через живучесть конструктивных элементов и должно существовать активное действие – любая активность (атака) противника, изменяющая поведение (состояние) наблюдаемого (контролируемого) объекта или какого-либо ресурса (КИИ).

Таким образом, должен существовать способ определения времени данного воздействия, его характеристик, а также объекта, производившего воздействие.

Под *поведением объекта* понимается реально наблюдаемое состояние наблюдаемого (контролируемого) объекта во времени, а под состоянием – множество состояний системы, в которых невозможно нарушение штатного функционирования, целостности и/или доступности ресурсов ИС (КИИ), что предусматривает отсутствие материального ущерба защищаемой системы [4].

Состояние ресурса оценивается как список объектов (модулей), имеющих доступ к ресурсу в данный момент времени и количественной оценки загрузки ресурса [5]. Информационная система (КИИ) представляет собой множество объектов (узлов): $O = (O_1, \dots, O_2, O_i, \dots, O_{i+1}, O_{i+q})$, распределенных по $n + k$ уровням иерархии с заданным бинарным отношением подчиненности. Объекты (узлы) O_1, \dots, O_{i+1} , распределенные по (n) уровням иерархии, являются органами управления (ОУ), генерирующими либо транслирующими актуальную информацию в узлы низшего уровня. Объекты (узлы) O_{i+1}, \dots, O_{i+q} низшего n -го уровня иерархии являются ОУ, реализующими управление на основе непосредственного применения, имеющихся в их распоряжении средств активного противодействия внешним воздействиям (рис. 1).

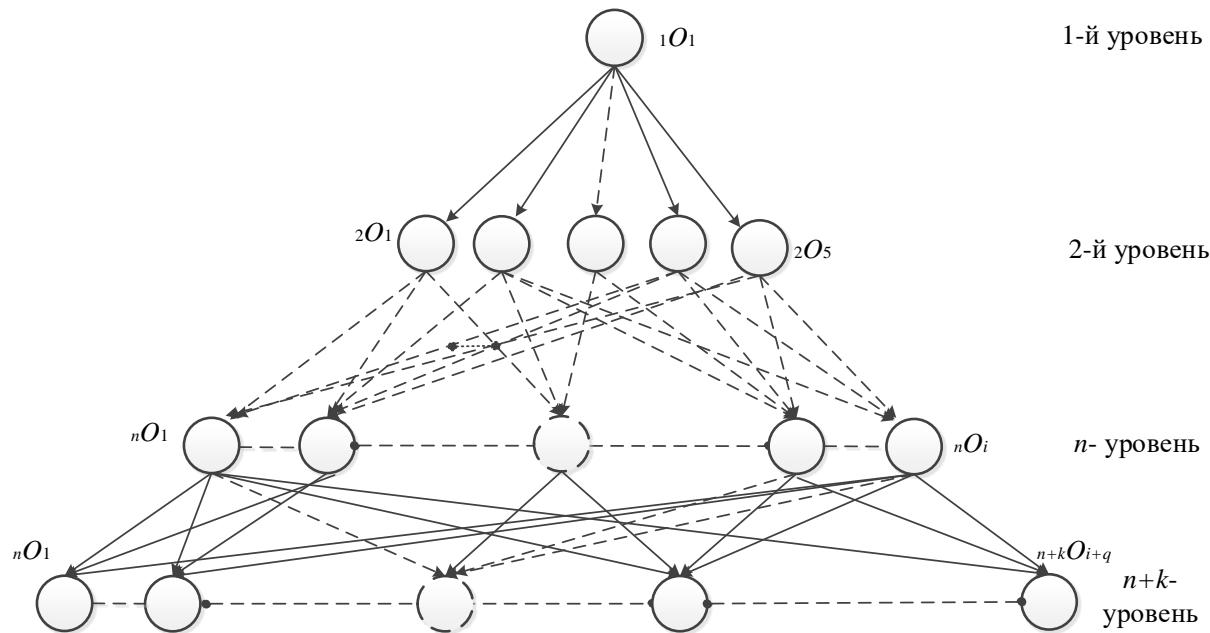


Рис. 1. Представление информационной системы в виде графовой структуры

Fig. 1. Representation of an information system as a graph structure

Структуру КИИ можно описать за-
висимостью

$$1O_1 \subset O, n+1O_1 \subset O, nO_i \subset O, \\ n+kO_{i+q} \subset O, n, i = 1, \overline{N}, \quad (1)$$

$$1O_1 > 2O_1 > nO_1 \dots n_{n+k}O_1 \\ 2O_1 > 3O_1 > nO_2 \dots n_{n+k}O_2 \quad (2) \\ \dots \dots \dots \\ nO_1 > n+1O_2 > n+2O_i \dots n_{n+k}O_{i+q}$$

с подчиненностью объектов

или

$$1O_1 > \begin{cases} 2O_1 > \begin{cases} 3O_1 \\ \dots \\ 3O_4 \\ \dots \\ 3O_i \end{cases} \dots \dots \dots; \\ 2O_4 > \begin{cases} 3O_{i+1} \\ \dots \\ 3O_{i+3} \\ \dots \\ 3O_{i+8} \end{cases} \dots \dots \dots n+kO_{i+q}; \\ \dots \\ n_{n+k}O_{i+q} > \begin{cases} 3O_{i+9} \\ \dots \\ 3O_{i+12} \\ \dots \\ 3O_{i+q} \end{cases} \dots \dots \dots \end{cases} \quad (3)$$

где \succ – символ строгого иерархического подчинения объектов ${}_{n+k}O_{i+q}$ КИИ; ${}_{n+k}O_i = {}_{n+k}O_i^\uparrow \cup {}_{n+k}O_i^\downarrow$ (${}_{n+k}O_{i+q} \in \mathcal{O}$) – множество ближайших соседей как объединение всех узлов вышестоящих и нижестоящих соседей, что обеспечивает формирование централизованной структуры. Отметим, что подсистемы низшего уровня $n+k$ могут иметь свои локальные цели, которые практически всегда совпадают с общей целью управления; ${}_{n+k}O_i^\downarrow = {}_{n+k}O_{i+q} \in \mathcal{O} | \exists \{({}_{n+k}O_i, {}_{n+k}O_{i+q}) \in E\}$ – множество нижестоящих ближайших соседей; для ${}_{n+k}O_{i+q}$ -го узла существует хотя бы одно ребро, соединяющее нижний и верхний уровни ($n_1, n+k$) множества E ;

$${}_1f_1 \subset F, {}_1f_2 \subset F, {}_n f_i \subset F, {}_{n+k}f_{i+q} \subset F, {}_{n+k}f_{i+q} \neq \emptyset, \quad (4)$$

$$\bigcup_{i=1}^N {}_{n+k}f_{i+q} = F, n, i = 1, \overline{N},$$

относится к полностью упорядоченным подмножествам объектов:

$$\begin{aligned} {}_1F_{i+1} &= ({}_1f_1, \dots, {}_1f_2, \dots, {}_1f_{i+1}); \\ {}_2F_{i+1} &= ({}_2f_1, \dots, {}_2f_2, \dots, {}_2f_{i+1}); \\ \dots & \\ {}_{n+k}F_{i+1} &= ({}_{n+k}f_1, \dots, {}_{n+k}f_2, \dots, {}_{n+k}f_{i+q}). \end{aligned} \quad (5)$$

Последовательное выполнение функций $i+q$ -го подмножества функций формирует команду для ${}_{n+k}O_{i+q}$ -го ОУ:

$$\begin{aligned} {}_1f_1: (J_1, \dots, {}_1f_2: (J_1), \dots, ({}_1f_i: (J_1)), \dots,), \dots &\rightarrow {}_1x_{i+1} \\ {}_2f_1: (J_2, \dots, {}_2f_2: (J_2), \dots, ({}_2f_i: (J_2)), \dots,), \dots &\rightarrow {}_2x_{i+1} \\ \dots & \\ {}_{n+k}f_{i+q}: (J_{n+k}, \dots, {}_{n+k}f_{n+k}: (J_{n+k}), \dots, ({}_{n+k}f_{i+q}: (J_{n+k})), \dots,), \dots &\rightarrow {}_{n+k}x_{i+q} \end{aligned} \quad (6)$$

где J_i – информация о состоянии ОУ, на основании которой разрабатывается актуальная информация для подчиненных объектов (узлов) уровня; ${}_{n+k}x_{i+q}$ – актуальная информация для ${}_{n+k}O_{i+q}$ -го ОУ.

В рамках моделирования оценки функционального состояния объектов КИИ в условиях деструктивных воздействий применим подход, предполагающий описание состояний системы с помощью тензорной теории построения метасистем. При построении модели полагаем, что два объекта (узла) системы имеют одностороннюю либо взаимную связь, если они достижимы друг для друга [7].

Для дальнейшего описания состояния объектов и системы в целом (КИИ), находящейся в условиях деструктивных воздействий, введем следующие понятия:

– *объекты системы*, в которой может быть несколько объектов каждого типа описываются *множеством элементов*, т. е. [0]:

$$\tilde{O} = (\tilde{O}_k^i | k \in N^i, i \in \overline{1, N_k}), \quad (7)$$

где \tilde{O}_k^i – собственное подмножество множества \tilde{O} объектов k -го типа; N^i – множество индексов типов объектов; i – номер объекта в подмножестве объектов k -го типа; N_k – количество объектов k -го типа.

– *свойства объекта* $\tilde{\Phi}_k(\tilde{O}_k)$ k -го типа определяются множеством :

$$\tilde{\Phi}_k(\tilde{O}_k^i) = (\tilde{\Phi}_{k,r} | k \in N^i, r \in R(k), \tilde{F}), \quad (8)$$

где $\tilde{\Phi}_{k,r}$ – r -е свойство объекта k -го типа; $R(k)$ – множество обозначений свойств объектов k -го типа; \tilde{F} – совокупность физических характеристик модулей (объектов);

– *отношения* между элементами КИИ определяются множеством:

$$\tilde{\Theta} = (\tilde{\Theta}_q | \tilde{O}_\xi | \xi \in \xi^* | q \in Q), \quad (9)$$

где $\tilde{\Theta}_q$ – отношение из числа допустимых отношений, заданных перечнем Q ; \tilde{O}_ξ – собственное подмножество объектов множества \tilde{O} , между которыми установлено отношение $\tilde{\Theta}_q$; ξ – список номеров объектов, объединяемых отношением $\tilde{\Theta}_q$; ξ^* – множество всех возможных списков.

При моделировании состояний модулей КИИ при деструктивных воздействиях основной проблемой является вопрос появления большого количества различных комбинаций пораженных и непораженных элементов – элементарные события в этой ситуации связаны логическим соотношением (идемпотентность дизъюнкции) $A_i \vee \bar{A}_i = I$, а все комбинации при деструктивном воздействии учтены сложным событием:

$$\bigwedge_q \bar{A}_j |_{N_k - q} \wedge A_j, \quad (10)$$

где $0 \leq q \leq N_k$ – пораженные элементы, а $(N_k - q)$ – непораженные элементы.

В силу несовместности таких комбинаций событий справедливо равенство:

$$\bigvee_{q=0}^{q=N_k} \left(\bigwedge_q \bar{A}_j |_{N_k - q} \wedge A_j \right) = I. \quad (11)$$

«Инфраструктурная механика модуля» КИИ, как указано в [2], может быть представлена в двух режимах – статичном и динамичном. В статичном режиме функционирование (*Static mode of functioning, SMF*) КИИ происходит при устоявшейся инфраструктуре и

описывается системой дифференциальных уравнений:

$$SMF = \begin{cases} \frac{dN_{kS}(\tilde{O}_k^i)}{dt} = 0, \\ \frac{dSYS(\tilde{\Theta})}{dt} = 0, \end{cases} \quad (12)$$

где $\frac{dN_{kS}(\tilde{O}_k^i)}{dt} = 0$ – условие неизменности во времени системных характеристик на инфраструктурном уровне, а $N_{kS}(\tilde{O}_k^i)$ – количество объектов (модулей) КИИ в сегменте S ; $SYS(\tilde{\Theta})$ – система межобъектных взаимосвязей на уровне межсубъектного взаимодействия.

Система модулей объекта перейдет в динамичный режим, как только измениться системная характеристика – $\frac{dN_{kS}(\tilde{O}_k^i)}{dt} \neq 0$. При этом выражение (12) приобретает вид $SMF = \left\{ \frac{dSYS(\tilde{\Theta})}{dt} \neq 0 \right\}$, определяющий переход состояния

объекта КИИ в режим частичного поражения его элементов ЭМИ.

Таким образом, процесс деструктивного воздействия имеет двухсторонний (дву направленный) характер: нападающая сторона (противник) старается обеспечить (создать) максимально возможное поражение до числа N_k , а работы по ликвидации последствий проводятся с $N_k(1 - P_S)$ выявленными элементами КИИ, т. е. при $P_S \rightarrow 0$ $N_k(1 - P) \rightarrow N_k$, что соответствует отсутствию какойлибо защиты КИИ. Таким образом, состояние P_S КИИ в условиях воздействия ЭМИ в любой момент времени может быть представлено множествами свойств $\tilde{\Phi}_k(\tilde{O}_k^i)$ объектов (модулей) \tilde{O}_k^i , множествами отношений $\tilde{\Theta}$ модулей системы, определённых множествами информационных технологий, их свойств, используемых в КИИ в следующем виде:

$$P_S \equiv \left\{ \left(SMF \left| \frac{dN_{kS}(\tilde{O}_k^i)}{dt} \neq 0 \right. \right), \tilde{\Phi}_k(\tilde{O}_k^i), \tilde{\Theta} \right\}, \quad (13)$$

где $M_{N_k}[q]$ – количественная оценка пораженных ЭМИ элементов КИИ определяется следующим выражением:

$$M_{N_k}[q] = \sum_{q=0}^{N_k} qf(q, N_k) \cong N_k P_S (1 - P_S), \quad (14)$$

$f(q, N_k)$ – есть вероятность появления любой комбинации пораженных и непораженных элементов N_k при $0 \leq f(q) < 1$, $N_k < \infty$.

Величина P_S связана с любыми мерами по повышению состояния живучести элементов N_k , начиная от внешней охраны, организационных мер по соблюдению контролируемой зоны (КЗ) до установки различных защитных средств.

Главное ограничение рассматриваемой модели состоит в предположении равновероятности поражения и сохранения работоспособности элементов КИИ при воздействии ЭМИ с реализацией для наихудшего случая [9].

Иерархическая механика «деградации КИИ поглощением» при воздействии ЭМИ

Исследуемая система управления (СУ) (рис. 2) представлена как много-

уровневая структура (дерево) с коэффициентом ветвления 2 и общим количеством узлов – 13 (каждый уровень дерева делится на 3 ветви). Суть процедуры «деградации КИИ поглощением» в условиях воздействия ЭМИ заключается в том, что процесс взаимодействия КИИ и внешней среды представляется путем задания связанных множеств узлов различных уровней иерархии (узлы

источники, транзитные узлы, узлы потребители), множеств поглощаемых объектов в соответствии с иерархией связей в системе и деструктивным воздействием. Критически важная информация поступает от верхнего уровня к нижнему, через промежуточный уровень иерархии и распределяется в соответствии с существующими связями между объектами [10].

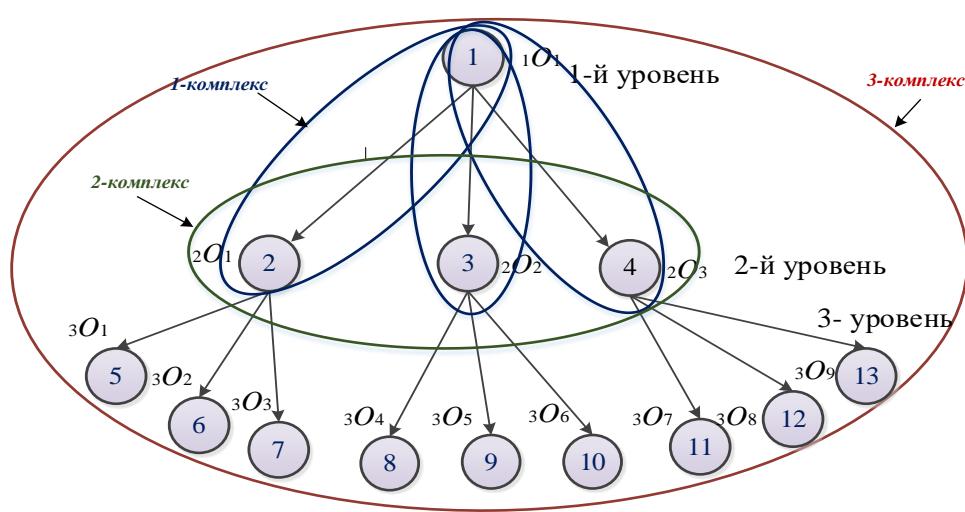


Рис. 2. Исследуемый граф критической информационной инфраструктуры, находящейся под воздействием ЭМИ с учетом иерархии цепей пересечений (граф G1)

Fig. 2. The studied graph of critical information infrastructure under the influence of EMI, taking into account the hierarchy of intersection chains (graph G1)

Таким образом, КИИ представляется как пара неупорядоченных множеств – множеством *переменных-параметров* (объектов КИИ, связей между ними и деструктивными воздействиями) и множеством *отношений*, связывающих значения этих переменных и заключающихся в последовательном определении набора объектов при поражении объектов различного уровня иерархии и поглощении подчиненных им объектов [11]. Ограничимся комбинацией набора

объектов при поражении от 1 до 3-х объектов 2-го уровня КИИ ($2O_1 \dots 2O_3$) с одновременным поражением от 1 до 9 объектов 3-го уровня ($3O_1 \dots 3O_9$) с последующим представлением закона распределения вероятности и количества информационных потерь при деструктивном воздействии¹. Комбинации «поглощений» объектом $1O_1$ объектов 2-го ($2O_1, 2O_2, 2O_3$) и 3-го уровней иерархии ($3O_1 \dots 3O_9$) [12] представлена ниже (рис. 3).

¹ Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023615974 Рос. Федерации. Вычислитель оптимальной маршрутизации информационных потоков

при деструктивных воздействиях на телекоммуникационные сети / А. А. Двилянский и [др.]. № 2023614758; заявл. 22.11.19; опубл. 21.03.23.

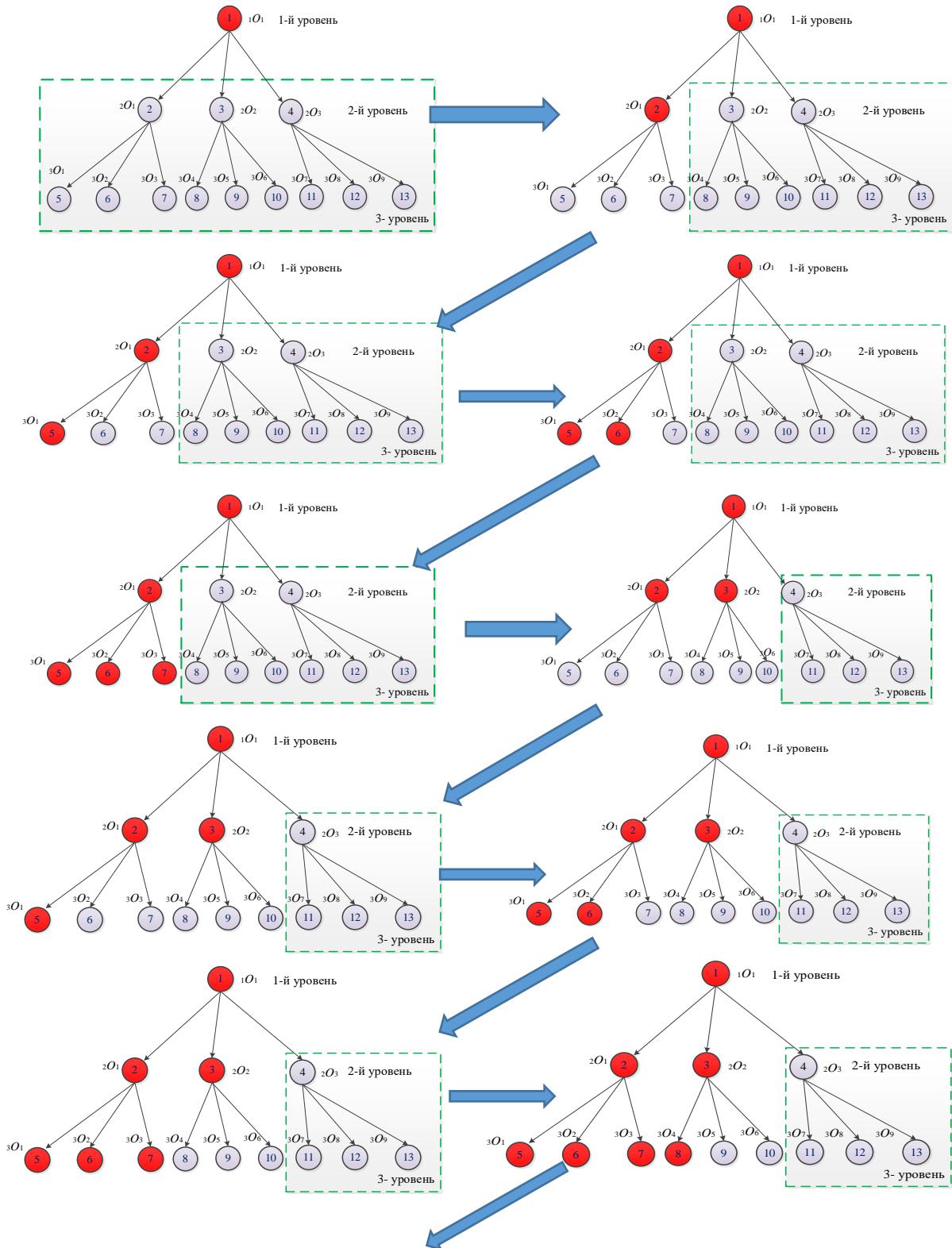


Рис. 3. Комбинации «поглощений» объектом $1O_1$ объектов 2-го ($2O_1, 2O_2, 2O_3$) и 3-го уровней иерархии ($3O_1 \dots 3O_9$) (окончание см. на с. 185)

Fig. 3. Combinations of "absorptions" by an object $1O_1$ objects 2nd ($2O_1, 2O_2, 2O_3$) and the 3rd level of the hierarchy ($3O_1 \dots 3O_9$) (for the end, see p. 185)

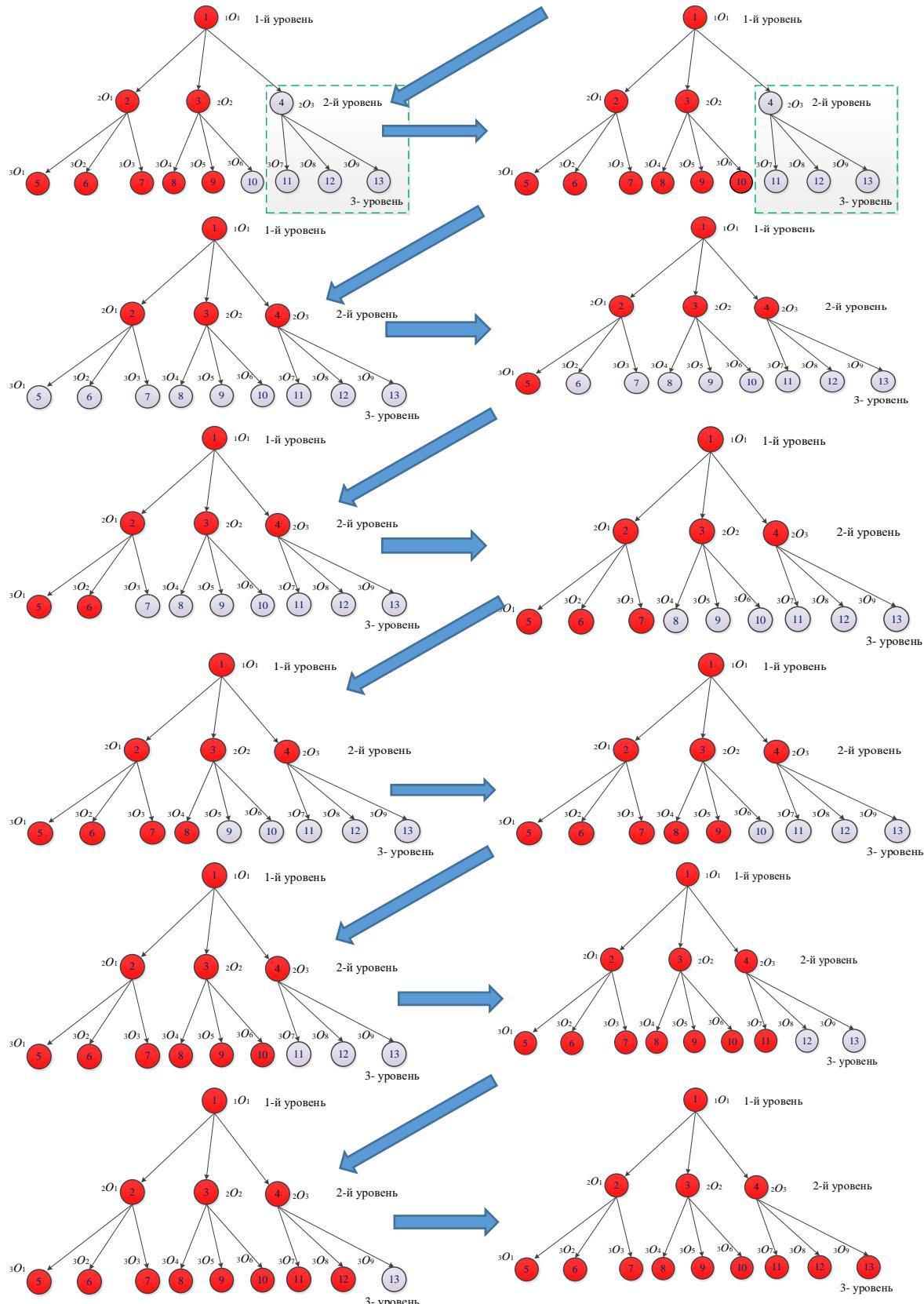


Рис. 3. Окончание (начало см. на с. 184)

Fig. 3. Ending (see beginning on p. 184)

Результаты и их обсуждение

Предложен ряд решающих правила для оценки «деградации КИИ поглощением»:

Правило 1. Если случайные числа Ψ_{i+q} , принадлежащие множеству узлов

$$if \Psi_{i+q} \in U \wedge \left[{}_{n+k} O_{i+q} = O_1^1 \wedge \left({}_2 O_{i+q} \wedge {}_3 O_{i+q} \right) \right] \Rightarrow E_G = 1. \quad (15)$$

Правило 2. Если случайные числа Ψ_{i+q} , принадлежащие множеству узлов графа, подвергающихся деструктивному воздействию, соответствуют объекту

$$if \Psi_{i+q} \in O \wedge \left({}_{n+k} O_{i+q} = {}_2 O_{i+q} \right) \Rightarrow E_G = \frac{\left\{ {}_2 O_{i+q} \mid P({}_2 O_{i+q}) \right\}}{\sum_{i=1}^j {}_2 O_{i+q}}. \quad (16)$$

Правило 3. Если случайные числа Ψ_{i+q} , принадлежащие множеству узлов графа, подвергающихся деструктивному воздействию, соответствуют объектам

$$if \Psi_{i+q} \in U \wedge \left({}_{n+k} O_{i+q} = {}_3 O_{i+q} \right) \Rightarrow E_G = \frac{\left\{ {}_3 O_{i+q} \mid P({}_3 O_{i+q}) \right\}}{\sum_{i=1}^j {}_3 O_{i+q}}. \quad (17)$$

Правило 4. Если случайные числа Ψ_{i+q} , принадлежащие множеству узлов графа, подвергающихся деструктивному воздействию, соответствуют объектам 2-го и 3-го уровня, при этом узлы 3-го

$$if \Psi_{i+q} \in O \wedge \left({}_{n+k} O_{i+q} = {}_2 O_{i+q} \right) \wedge \left({}_2 O_{i+q} \succ {}_3 O_{i+q} \right) \Rightarrow E_G = \frac{\left\{ {}_2 O_{i+q} \mid P({}_2 O_{i+q}) \right\}}{\sum_{i=1}^j {}_2 O_{i+q}}. \quad (18)$$

Правило 5. Если случайные числа Ψ_{i+q} , принадлежащие множеству узлов графа, подвергающихся деструктивному воздействию, соответствуют объекту

графа, подвергающихся деструктивному воздействию, соответствуют объекту 1-го уровня, то потери равны 1 в любых сочетаниях с деградирующими узлами 2-го и 3-го уровней [13]:

2-го уровня, потери равны количеству деградирующих узлов уровня 2, деленных на общее количество узлов 2 уровня¹:

$$3\text{-го уровня, потери равны количеству деградирующих узлов уровня 3, деленных на общее количество узлов 3 уровня [14]:}$$

$$уровня находятся в подчиненности узлам 2-го уровня, потери равны количеству деградирующих узлов уровня 2, деленных на общее количество узлов 2 уровня [15]:$$

$$2\text{-го и 3-го уровня, при этом деградирующие узлы 3-го уровня не находятся в подчиненности деградирующему узлам 2-го уровня, потери равны сумме$$

¹ Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № RU 2023681706 Рос. Федерация. Реализация квадратурных цифровых фильтров, функциони-

рующих в условиях деструктивных электромагнитных воздействий / А. А. Двильянский [и др.]. № 2023662602; заявл. 09.10.23; опубл. 17.10.23.

количества деградирующих узлов уровня 2, деленных на общее количество узлов 2 уровня и количество

деградирующих узлов 3 уровня, деленных на общее количество узлов 3 уровня [16]:

$$\begin{aligned} \text{if } \Psi_{i+q} \in O \wedge \left[\left({}_{n+k} O_{i+q} = {}_2 O_{i+q} \right) \wedge \left({}_{n+k} O_{i+q} = {}_3 O_{i+q} \right) \right] \Rightarrow \\ \Rightarrow E_G = \frac{\left\{ {}_2 O_{i+q} \mid P({}_2 O_{i+q}) \right\}}{\sum_{i=1}^j {}_2 O_{i+q}} + \frac{\left\{ {}_3 O_{i+q} \mid P({}_3 O_{i+q}) \right\}}{\sum_{i=1}^j {}_3 O_{i+q}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Для получения набора показателей, характеризующих численное значение деградации (потерь) объектов КИИ при деструктивном воздействии, проводится классификации неоднородных статистических совокупностей [17]:

1. На первом этапе генерируется множество случайных чисел, однозначно соответствующее (принадлежащее) множеству объектов (узлов) КИИ:

Если $\forall {}_{n+k} O_{i+q} \exists \Psi_i \rightarrow \theta_i = \text{if } \Psi_{i+q} \in O \wedge \left({}_{n+k} O_{i+q} = {}_2 O_{i+q} \right) \Rightarrow E_G = \frac{\left\{ {}_2 O_{i+q} \mid P({}_2 O_{i+q}) \right\}}{\sum_{i=1}^j {}_2 O_{i+q}}$

Если $\forall {}_{n+k} O_{i+q} \nexists \Psi_i \rightarrow \theta_i = 0$.

Если для всех (для любого) узлов существует случайное число из заданного множества, переменная Θ_i принимает значение 1, в противном случае 0. Если переменная Θ_i принимает значение 1, то выполняется суммирование всех переменных с последующим произведением на величину единичных потерь информации. Завершением первого этапа является вычисление потерь информации для каждой генерации случайных чисел:

Если $\theta_i = 1 \rightarrow E = E_i \sum_{i=1}^{\Psi} \theta_i$. (22)

2. На втором этапе, в соответствии с отношением эквивалентности, выполни-

$$\Psi = \left\{ {}_{n+k} O_{i+q} \mid 1 \leq {}_{n+k} O_{i+q} \leq 0 \right\} \quad (20)$$

где Ψ – множество чисел, принадлежащих отрезку [1-0 (выражение 1)] который соответствует количеству объектов КИИ.

Поражения объекта КИИ определяется следующим условием [18]:

$$E_G = \frac{\left\{ {}_2 O_{i+q} \mid P({}_2 O_{i+q}) \right\}}{\sum_{i=1}^j {}_2 O_{i+q}}. \quad (21)$$

ется разбиение всего множества данных E_i на непересекающиеся классы, в каждом из которых результаты моделирования признаются тождественными, неразличимыми, а данные из разных классов считаются нетождественными выполним с помощью кластеризации данного множества:

$$M_{l,i,j} = \sum_{l=1}^m |E_i^l - E_j^l|, \quad (23)$$

где E_i^l – значение l -го признака у i -го объекта, $l = \overline{1, m}$; $i, j = \overline{1, n}$; \bar{x} – вектор-столбец значений всех признаков на i -м объекте; 1 – наличие свойства, 0 – отсутствие:

$$M_{l,i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } |E_i^l - E_j^l| \leq \varepsilon_i, \\ 0, & \text{в любом другом случае.} \end{cases} \quad (24)$$

После получения непересекающихся классов E_i (отношение эквивалентности) все информационные сущности внутри найденного класса считаем тождественными, а разных классов – нет.

Выводы

В статье представлена возможность математического описания состояния КИИ, находящейся под деструктивным воздействием с помощью тензорного и кластерного анализа с последующей

иерархической механикой процедуры «деградации КИИ поглощением» при воздействии ЭМИ с формулировкой и применением решающих правил в ходе данного процесса.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку гибких методов, которые должны обеспечить требуемые показатели устойчивости сложных организационно-технических систем при воздействии деструктивных электромагнитных излучений, что и отражает развитие идеи комплексности решения исследуемой проблемы.

Список литературы

1. Максимова Е. А. Методы выявления и идентификации источников деструктивных воздействий инфраструктурного генеза // Электронный сетевой политехнический журнал «Научные труды КубГТУ». 2022. № 2. С. 86–99.
2. Максимова Е. А. Модель состояний субъектов критической информационной инфраструктуры при деструктивных воздействиях в статичном режиме // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7, № 3. С. 65–72.
3. Двилянский А. А., Иванов В. А. Методология оценки комплексной защищенності объектов инфокоммуникационных систем от воздействия деструктивных электромагнитных излучений: монография. Орёл: Академия ФСО России, 2018. 230 с.
4. Роль и место электромагнитного оружия при реализации наступательной стратегии в информационной специальной операции / В. А. Иванов, А. А. Двилянский, И. В. Иванов, Е. А. Гондаренко [и др.] // Техника средств связи. 2022. № 3 (159). С. 62–73.
5. Сундеев П. В. Кластерная модель защиты распределенного реестра // Вопросы кибербезопасности. 2025. № 4 (68). С. 2–8. <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2025-4-2-8>
6. Research and Development of Delay-Sensitive Routing Tensor Model in IoT Core Networks / O. Lemeshko, J. Papan, O. Yeremenko, M. Yevdokymenko, P. Segec // Sensors (Basel). 2021. N 21(11). P. 3934. <https://doi.org/10.3390/s21113934>
7. Устойчивость технологических процессов в аспекте безопасности критической информационной инфраструктуры / Г. П. Гавдан, А. Н. Вавичкин, В. Г. Иваненко, Ю. Д. Кулешова, Э. П. Рыбалко // Безопасность информационных технологий = IT Security. 2023. Т. 30, № 2. С. 32–52. <https://doi.org/10.26583/bit.2023.2.02>

8. Математическая модель состояния сетей и узлов связи в алгебраическом пространстве тензорного поля при их поражении электромагнитным импульсом / А. А. Двиллянский, В. А. Иванов, М. Ю. Рытов, Е. А. Гондаренко, Г. В. Гурьев // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21. № 2. С. 102–109.
9. Двиллянский А. А., Иванов В. А., Конышев М. Ю. Эргооптимизация системы обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры в условиях деструктивного электромагнитного воздействия // Эргодизайн. 2021. № 12. С. 118–125.
10. Вайсфельд М. Объектно ориентированный подход. СПб.: Питер, 2020. 256 с.
11. Современные методы оптимизации и особенности их применения / С. М. Бекетов, Д. А. Зубкова, А. М. Гинцяк, Ж. В. Бурлуцкая, С. Г. Редько // Russian Technological Journal. 2025. Т. 13, № 4. С. 78-94.
12. Распределенное информационное пространство как ассоциативная среда инфокоммуникационных сетевых структур / Н. Р. Юсупбеков, Ш. М. Гулямов, В. Б. Тарасов, Н. Б. Усманова, М. Ю. Дощенко // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 3. С. 20–29.
13. Тамм Ю. А. Оптимизация размещения новых магистральных узловых станций при структурном расширении действующей инфокоммуникационной сети // Проектирование и технология электронных средств. 2019. № 2. С. 20–24.
14. Двиллянский А. А. Математический метод моделирования ущерба, наносимого объектам критической информационной инфраструктуры при воздействии деструктивных электромагнитных излучений // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 8. С. 45–51.
15. Двиллянский А. А. Численный метод оптимизации экономических затрат в рамках обеспечения функциональной устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры в условиях воздействия электромагнитных импульсов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 9. С. 54–59.
16. Одоевский С. М., Лебедев П. В. Методика оценки устойчивости функционирования системы технологического управления инфокоммуникационной сетью специального назначения с заданной топологической и функциональной структурой // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 1. С. 152–189.
17. A way to ensure the Reliability of Information Portals of Regional Executive Authorities / M. Y. Rytov, V. T. Eremenko, A. A. Dvilyanskiy, A. P. Gorlov, O. V. Tretyakov, M. L. Gulak // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. Vol. 8, Is. 6S3. P. 614–617
18. Методика обоснования требуемого уровня стойкости оборудования сетей связи в условиях внешних деструктивных воздействий / С. С. Семенов, А. С. Белов, В. С. Воловиков, А. В. Скубьев // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 1. С. 33–53. <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10102>

References

1. Maksimova E.A. Methods of identification and identification of sources of destructive impacts of infrastructural genesis. *Elektronnyi setevoi politematicheskii zhurnal «Nauchnye trudy KubGTU» = Online Journal of Political Science Scientific "Papers of Kuban State Technological University".* 2022;(2):86–99. (In Russ.)
2. Maksimova E.A. Model of states of subjects of critical information infrastructure under destructive influences in a static mode. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi = Proceedings of Educational Institutions of Communications.* 2021;7(3):65–72. (In Russ.)
3. Dviliansky A.A., Ivanov V.A. Methodology for assessing the integrated protection of infocommunication system facilities from the effects of destructive electromagnetic radiation. Orel: Akademiya FSO Rossii; 2018. 230 p. (In Russ.)
4. Ivanov V.A., Dviliansky A.A., Ivanov I.V., Gondarenko E.A., et al. The role and place of electromagnetic weapons in the implementation of an offensive strategy in an information special operation. *Tekhnika sredstv svyazi = Means of Communication Equipmen.* 2022;(3):62–73. (In Russ.)
5. Sundeev P.V. Cluster model of distributed registry protection. *Voprosy kiberbezopasnosti = Cybersecurity Issues.* 2025;(4):2–8. (In Russ.) <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2025-4-2-8>
6. Lemeshko O., Papan J., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Segec P. Research and Development of Delay-Sensitive Routing Tensor Model in IoT Core Networks. *Sensors (Basel).* 2021;(21):3934. <https://doi.org/10.3390/s21113934>
7. Gavdan G.P., Vavichkin A.N., Ivanenko V.G., Kuleshova Yu.D., Rybalko E.P. Sustainability of technological processes in the aspect of security of critical information infrastructure. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologii = IT Security = Information Technology Security = IT Security.* 2023;30(2):32–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/bit.2023.2.02>
8. Dviliansky A.A., Ivanov V.A., Rytov M.Yu., E.A. Gondarenko, Guryev G.V. Mathematical model of the state of networks and communication nodes in the algebraic space of a tensor field when they are affected by an electromagnetic pulse. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve = Intellectual Systems in Production.* 2023;21(2):102–109. (In Russ.)
9. Dviliansky A.A., Ivanov V.A., Konyshov M.Yu. Ergooptimization of the system for ensuring the functional stability of critical information infrastructure facilities under conditions of destructive electromagnetic influence. *Ergodizain = Ergodesign.* 2021;(12):118–125. (In Russ.)
10. Weisfeld M. The object-oriented approach. Saint Petersburg: Piter; 2020. 256 p. (In Russ.)
11. Beketov S.M., Zubkova D.A., Gintsyak A.M., Burlutskaya Zh.V., Redko S.G. Modern optimization methods and features of their application. *Russian Technological Journal.* 2025;13(4):78–94. (In Russ.)

12. Yusupbekov N.R., Gulyamov Sh.M., Tarasov V.B., Usmanova N.B., Doschananova M.Y. Distributed information space as an associative environment of infocommunication network structures. *Promyshlennye ASU i kontrollery = Industrial ACS and Controllers*. 2019;(3):20–29. (In Russ.)
13. Tamm Yu.A. Optimization of the placement of new backbone hub stations with the structural expansion of the existing infocommunication network. *Proektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and Technology of Electronic Devices*. 2019;(2):20–24. (In Russ.)
14. Dviliansky A.A. Mathematical method of modeling damage caused to objects of critical information infrastructure when exposed to destructive electromagnetic radiation. *Promyshlennye ASU i kontrollery = Industrial ACS and Controllers*. 2019;(8):45–51. (In Russ.)
15. Dviliansky A.A. Numerical method for optimizing economic costs in the framework of ensuring the functional stability of critical information infrastructure facilities under the influence of electromagnetic pulses. *Promyshlennye ASU i kontrollery = Industrial ACS and controllers*. 2019;(9):54–59. (In Russ.)
16. Odoevsky S.M., Lebedev P.V. Methodology for assessing the stability of the technological management system of a special-purpose infocommunication network with a given topological and functional structure. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Systems of Control, Communication and Security*. 2021;(1):152–189. (In Russ.)
17. Rytov M.Y., Egemeiko V.T., Dvilyansky A.A., Gorlov A.P., Tretyakov O.V., Gulak M.L. A way to ensure the Reliability of Information Portals of Regional Executive Authorities. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019;8(6S3):614–617.
18. Semenov S.S., Belov A.S., Volovikov V.S., Skubyev A.V. Methodology for substantiating the required level of durability of communication network equipment in conditions of external destructive influences. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Systems of Control, Communication and Security*. 2019;(1):33–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10102>

Информация об авторе / Information about the Author

Двильянский Алексей Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры геоинформационных систем, МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: dvilyanskiy@mirea.ru, ORCID: 0000-0002-0648-3651

Alexey A. Dvilyansky, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Geoformation Systems, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation, e-mail: dvilyanskiy@mirea.ru, ORCID: 0000-0002-0648-3651

Оценка эффективности модели глубокого обучения на основе EfficientNetB3 для дифференциальной диагностики стадий болезни Альцгеймера

А. В. Киселев¹ , Е. А. Кулешова¹, М. О. Таныгин¹,
П. М. Свинухов¹, И. А. Халин¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

 e-mail: kiselevalexey1990@gmail.com

Резюме

Цель исследования – оценка эффективности применения модифицированной архитектуры EfficientNetB3 на основе методов трансферного глубокого обучения и ранней остановки в системах поддержки принятия врачебных решений для дифференциальной диагностики стадий болезни Альцгеймера.

Методы. Для проведения экспериментальных исследований был сформирован набор данных для обучения, проведена нормализация и аугментация данных. Выполнена программная реализация модифицированной нейросетевой архитектуры EfficientNetB3 с применением методов трансферного глубокого обучения и ранней остановки на языке программирования Python. Проведено обучение нейросетевой модели.

Результаты. Оценка эффективности классификации, обученной нейросетевой модели, проводилась с помощью метрик Recall, Precision, Specificity, F1-мера и AUC-ROC. Анализ значений этих метрик показал, что результаты, продемонстрированные модифицированной архитектурой EfficientNetB3, характеризуются выраженной асимметрией и указывают на узкоспециализированный характер данной модели. С одной стороны, модель проявила себя как эффективный инструмент для диагностики стадии умеренной деменции, продемонстрировав максимально возможное значение AUC. С другой стороны, эффективность классификации для остальных классов значительно ниже (значения AUC для классов «Отсутствие деменции», «Очень лёгкая деменция» и «Лёгкая деменция» равны 0,87, 0,86 и 0,95 соответственно).

Заключение. Исходя из результатов проведенного анализа можно сделать вывод, что основная практическая ценность данной модификации архитектуры EfficientNetB3 заключается в ее использовании в составе гетерогенных ансамблей или каскадных системах диагностики для верификации конкретной стадии болезни Альцгеймера – умеренной деменции с целью повышения общей эффективности системы. Это указывает на перспективность дальнейших исследований в области создания узкоспециализированных архитектур, способных решать конкретные подзадачи с высокой точностью, превосходящей универсальные, но менее сфокусированные подходы.

Ключевые слова: болезнь Альцгеймера; нейросетевая модель; трансферное обучение; глубокое обучение; классификация; дифференциальная диагностика.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Для цитирования: Оценка эффективности модели глубокого обучения на основе EfficientNetB3 для дифференциальной диагностики стадий болезни Альцгеймера / А. В. Киселев, Е. А. Кулешова, М. О. Таныгин, П. М. Свинухов, И. А. Халин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 4. С. 192–210. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-192-210>

Поступила в редакцию 29.10.2025

Подписана в печать 27.11.2025

Опубликована 26.11.2025

Evaluation of the effectiveness of a deep learning model based on EfficientNetB3 for differential diagnosis of Alzheimer's disease stages

Alexey V. Kiselev¹ , Elena A. Kuleshova¹, Maxim O. Tanygin¹,
Pavel M. Svinuhov¹, Igor A. Khalin¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

 e-mail: kiselevalexey1990@gmail.com

Abstract

The purpose of the research is evaluation of the effectiveness of the modified EfficientNetB3 architecture based on transfer deep learning and early stopping methods in medical decision support systems for differential diagnosis of Alzheimer's disease stages.

Methods. To conduct experimental studies, a training dataset was generated, normalized, and augmented. A modified EfficientNetB3 neural network architecture was implemented using transfer learning and early stopping methods in Python. The neural network model was trained..

Results. The classification performance of the trained neural network model was assessed using the Recall, Precision, Specificity, F1-score, and AUC-ROC metrics. Analysis of these metrics revealed that the results achieved by the modified EfficientNetB3 architecture are characterized by significant asymmetry, indicating the highly specialized nature of this model. On the one hand, the model proved to be an effective tool for diagnosing moderate dementia, demonstrating the highest possible AUC value. On the other hand, classification performance for the remaining classes was significantly lower (AUC values for the "No Dementia," "Very Mild Dementia," and "Mild Dementia" classes were 0,87, 0,86, and 0,95, respectively).

Conclusion. Based on the results of the analysis, it can be concluded that the primary practical value of this modification of the EfficientNetB3 architecture lies in its use in heterogeneous ensembles or cascaded diagnostic systems for verifying a specific stage of Alzheimer's disease – moderate dementia – in order to improve the overall system efficiency. This points to the potential for further research in the area of creating highly specialized architectures capable of solving specific subproblems with high accuracy, surpassing general-purpose but less focused approaches.

Keywords: Alzheimer's disease; neural network model; transfer learning; deep learning; classification; differential diagnosis.

Conflict of interest: The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

For citation: Kiselev A.V., Kuleshova E.A., Tanygin M.O., Svinuhov P.M., Khalin I.A. Evaluation of the effectiveness of a deep learning model based on EfficientNetB3 for differential diagnosis of Alzheimer's disease stages. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(4):192–210. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-192-210>

Received 29.10.2025

Accepted 27.11.2025

Published 26.12.2025

Введение

Нейродегенеративные заболевания представляют собой гетерогенную группу прогрессирующих патологий центральной нервной системы, ключевым патогенетическим механизмом которых является постепенная гибель нейронов. К наиболее распространённым заболеваниям этой категории относят болезнь Альцгеймера, болезнь Паркинсона, боковой амиотрофический склероз и болезнь Хантингтона. Несмотря на общее нейродегенеративное происхождение, эти заболевания существенно различаются по клинической картине, локализации патологического процесса, скорости прогрессирования и молекулярно-генетическим механизмам [1].

Болезнь Альцгеймера (БА) представляет собой одну из наиболее распространённых форм деменции, сопровождающуюся необратимым прогрессирующим нейродегенеративным процессом, приводящим к снижению когнитивных функций, утрате памяти и дезорганизации повседневной активности. Согласно данным из Всемирного отчета о болезни Альцгеймера Международной организация по борьбе с болезнью Альцгеймера за 2021 г., число людей, живущих с деменцией, превышает 55 млн, из которых более 60% приходится на БА. Прогнозируется, что к 2050 г. эта цифра достигнет 152,8 миллионов [2]. Основной фактор риска – пожилой возраст, однако на ранних стадиях БА может проявляться и у пациентов среднего возраста, особенно

в случае генетической предрасположенности. В настоящее время ранняя диагностика БА остаётся затруднённой вследствие неспецифичности симптоматики на начальных стадиях, а также ограниченного доступа к дорогостоящим и инвазивным методам подтверждения диагноза [3].

Несвоевременное выявление заболевания существенно снижает эффективность возможной терапии, замедляющей прогрессирование симптомов. В связи с этим возрастаёт потребность в разработке инструментов ранней неинвазивной диагностики, способных выявлять патологические изменения в мозге до наступления выраженной клинической картины. Магнитно-резонансная томография (МРТ) представляет собой один из ключевых методов нейровизуализации, применяемый для диагностики и мониторинга нейродегенеративных заболеваний. МРТ позволяет визуализировать структурные изменения головного мозга, в частности, атрофию гиппокампа, парагиппокампальных извилин, коры медиальных височных долей, а также изменения в белом веществе [4].

В условиях постоянного роста числа пожилого населения и, как следствие, распространённости нейродегенеративных расстройств, особенно актуальным становится вопрос создания автоматизированных методов обработки и анализа нейровизуализационных данных, которые смогут повысить эффективность ранней диагностики данного вида заболеваний и сократить временные затраты

медицинского персонала. Также это может помочь справиться с недостатком специалистов и повысить доступность качественной диагностики для населения, не зависящей от географического положения или экспертного опыта отдельных врачей [5]. В основе таких методов чаще всего лежат алгоритмы машинного обучения, способные выявлять патологические изменения при анализе медицинских изображений [6]. Благодаря способности к автоматическому извлечению пространственных признаков, сверточные нейронные сети (СНС) демонстрируют высокую эффективность при обработке и анализе медицинских изображений, в т. ч. полученных с помощью МРТ [7].

В работе [8] авторами был проведен анализ эффективности применения различных нейросетевых моделей (НМ) для обнаружения болезни Альцгеймера на МРТ-снимках. Авторы обучили и сравнили шесть моделей СНС с использованием трансферного обучения (ТО): VGG19, ResNet101, EfficientNetB3, MobileNetV2, InceptionV3 и DenseNet121 – для классификации МРТ-снимков по 2 классам (БА и отсутствие болезни). В результате экспериментов НМ InceptionV3 показала наиболее высокое значение метрики оценки качества классификации Accuracy, равное 99,2%.

В работе [9] авторы предложили модель для диагностики БА на основе СНС, обученную на МРТ-снимках. Обученная модель показала значение метрики Accuracy, равное 95, при

классификации МРТ-снимков по 4 классам (преддеменция, ранняя деменция, умеренная деменция и без заболевания).

Однако стоит отметить, что при расчете метрики оценки качества классификации Accuracy не учитываются штрафы за ложноотрицательные ошибки, также стоит отметить, что данная метрика имеет низкую чувствительность к дисбалансу классов, что, в свою очередь, весьма критично для задач медицинской диагностики [10].

В работе [11] авторы провели ряд экспериментов с различными архитектурами СНС и использованием метода ТО для решения задачи классификации МРТ-снимков по 3 классам (БА, легкие когнитивные нарушения и когнитивная норма). В ходе экспериментов авторы использовали четыре модели без применения ТО и четыре модели с применением ТО. Модели на основе СНС дали информацию о выявленном типе деменции, уровне достоверности диагноза и тепловых картах, созданных с помощью градиентно-взвешенного картирования активации классов (Grad-CAM), выделяющих патологически пораженные области мозга. Хотя оба подхода продемонстрировали высокую эффективность классификации, модели на основе ТО показали лучшие результаты (макро-среднее значение метрики AUC-ROC по трем классам, равное 0,86 и 0,97, для показавших лучший результат моделей без использования ТО и с применением ТО соответственно).

Результаты предшествующих исследований указывают на высокий потенциал применения моделей на основе СНС, в частности моделей, основанных на глубоком ТО, для раннего обнаружения и дифференциации нейродегенеративных заболеваний в системах поддержки принятия врачебных решений [12]. Такие системы могут помочь медицинским работникам сократить время диагностики деменции, оптимизировать индивидуальные стратегии управления и лечения для пациентов.

Материалы и методы

Набор данных для обучения был синтезирован на основе изображений из репозитория «Инициативы по нейровизуализации болезни Альцгеймера» (ADNI) [13]. Изначально набор данных содержал 6400 изображений, разделенных на четыре класса: отсутствие признаков деменции (Non Demented), очень лёгкая деменция (Very Mild Demented), лёгкая деменция (Mild Demented) и умеренная деменция (Moderate Demented).

Первичный анализ распределения данных по классам выявил выраженный дисбаланс классов: наиболее многочисленными были классы Non Demented и Very Mild Demented, тогда как класс Moderate Demented оказался существенно менее представленным. Такая диспропорция способна приводить к смещению предсказаний модели в сторону более часто встречающихся классов и затруднить обучение на менее представительных примерах [14]. Для преодоления этой проблемы, а также в целях увеличения объема обучающей выборки и снижения риска переобучения был применён метод аугментации

изображений [15]. С помощью библиотеки Keras была реализована аугментация изображений, включающая следующие операции: случайное вращение в пределах ± 15 градусов, горизонтальное отражение, масштабирование и сдвиги по ширине и высоте до 10%, а также сдвиги по срезу (shearing), что позволило расширить набор данных до 33984 изображений. Все изображения автоматически приводились к размеру 224×224 пикселя, соответствующему входному формату модели EfficientNetB3. Нормализация данных проводилась с использованием функции efficientnet_preprocess, обеспечивающей совместимость с предобученными на наборе данных ImageNet слоями модели.

Вместо использования стандартного генератора ImageDataGenerator для поддержки совместимости с текущей версией библиотеки TensorFlow применялись пользовательские генераторы, построенные на API tf.data.Dataset, включающие поддержку пакетной загрузки, предварительной обработки, кэширования и буферизации. Для обеспечения возможности масштабируемого использования аппаратных ресурсов, в т. ч. GPU, был использован размер пакета данных (batch size), равный 32. Для разделения исходного массива изображений на обучающую и валидационную выборки использовалось стратифицированное разбиение с отношением 80:20 по каждому классу.

Предлагаемая НМ базируется на методе ТО [16], использующем модифицированную архитектуру EfficientNetB3. В рамках модификации НМ поверх «замороженных» слоев базовой модели были добавлены следующие классификацион-

ные слои: глобальный слой усредняющего пулинга (ГСУП) для уменьшения пространственной размерности признаков, слой пакетной нормализации (СПН) для стабилизации обучения, полносвязанный слой (ПС) с 1024 нейронами, а также слой Dropout с коэффициентом 0,5 для предотвращения переобучения путем случайного отключения части нейронов в процессе обучения.

ПС применяется для интеграции и обобщения признаков, извлечённых предыдущими слоями. ПС был добавлен поверх сверточной базы EfficientNetB3 с целью последующей классификации на основе признаков, извлечённых из МРТ-снимка. Для обеспечения нелинейности модели и эффективности обработки градиентов в качестве функции активации используется ReLU.

Пусть входной вектор признаков из предыдущего слоя обозначается как

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^n, \quad (1)$$

где n – размерность входного пространства (например, после слоя GlobalAveragePooling2D она составляет 1536 для EfficientNetB3).

В ПС с $m = 1024$ нейронами выполняются следующие преобразования:

1. Линейная комбинация признаков по

$$z_j = \sum_{i=1}^n w_{ji} x_i + b_j, \quad j = 1, 2, \dots, 1024, \quad (2)$$

где w_{ji} – вес связи между входом i и нейроном j ; x_i – входной вектор признаков; b_j – смещение (bias).

В матричной форме линейная комбинация признаков определяется согласно

$$\begin{aligned} z &= \mathbf{Wx} + \mathbf{b}, \quad \mathbf{W} \in \mathbb{R}^{1024 \times n}, \\ \mathbf{b} &\in \mathbb{R}^{1024}. \end{aligned} \quad (3)$$

2. Активация с использованием функции ReLU по

$$a_j = \text{ReLU}(z_j) = \max(0, z_j). \quad (4)$$

В векторной форме выход слоя после активации определяется по

$$\mathbf{a} = \text{ReLU}(\mathbf{z}) \in \mathbb{R}^{1024}. \quad (5)$$

ПС с 1024 нейронами выполняет функцию высокой абстракции – он компонирует представление, полученное после сверточного анализа, в более компактное и классификационно-значимое пространство. Данная размерность выбрана эмпирически как компромисс между выразительностью и числом параметров модели с учетом требований к производительности и ограниченного объема доступных обучающих данных.

Одним из преимуществ ГСУП в контексте модификации НМ является его способность существенно уменьшать число параметров модели, поскольку его применение позволяет избежать использования полносвязанных слоев с большим количеством входов. Это особенно важно при обучении модели на ограниченном количестве МРТ-снимков, где избыточные параметры могут привести к переобучению. Кроме того, ГСУП облегчает интерпретацию модели: каждый элемент итогового вектора непосредственно соответствует определенному фильтру признаков, что используется при последующей визуализации тепловых карт (метод Grad-CAM).

В контексте данного исследования ГСУП применяется после финального сверточного блока модели EfficientNetB3.

Он преобразует трехмерную карту признаков в вектор признаков фиксированной длины, который затем подается на выходной слой с функцией активации softmax, производящий вероятностное распределение по классам.

ГСУП представляет собой альтернативу стандартным ПС, обычно применяемым после сверточных блоков нейронной сети, которые увеличивают число параметров модели и тем самым повышают риск переобучения. ГСУП обеспечивает интерпретируемую форму агрегирования пространственной информации по каналам признаков.

Работу ГСУП можно описать следующим образом: на вход подается тензор признаков после сверточных операций, имеющий размерность $H \times W \times C$, где H и W – пространственные размеры (высота и ширина карты признаков), а C – количество каналов. Для каждого канала c (от 1 до C) ГСУП вычисляет среднее значение по всем пространственным координатам этого канала по

$$z_c = \frac{1}{H \cdot W} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W x_{i,j,c}, \quad (6)$$

где $x_{i,j,c}$ – значение тензора признаков в позиции (i, j) канала c ; z_c – результирующее скалярное значение, полученное для канала c после применения усредняющего пулинга.

Таким образом, результатом работы ГСУП является одномерный вектор $z = [z_1, z_2, \dots, z_C] \in \mathbb{R}^C$, в котором каждый элемент отражает агрегированную активность соответствующего канала.

В рамках исследования слой BatchNormalization (BN) был добавлен между сверточными и ПС классификатора. Входом в слой BN является мини-

батч из m примеров $x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(m)}$, где каждый элемент $x^{(i)}$ – это скалярное значение активации на выходе предыдущего слоя. Математическая формализация данного слоя выглядит следующим образом:

1. Расчет среднего значения по батчу:

$$\mu_B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x^{(i)}. \quad (7)$$

2. Расчет дисперсии по батчу:

$$\sigma_B^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x^{(i)} - \mu_B)^2. \quad (8)$$

3. Нормализация каждого значения:

$$\hat{x}^{(i)} = \frac{x^{(i)} - \mu_B}{\sqrt{\sigma_B^2 + \epsilon}}, \quad (9)$$

где ϵ – небольшая положительная константа для численной устойчивости.

4. Линейное преобразование с обучаемыми параметрами:

$$y^{(i)} = \gamma \hat{x}^{(i)} + \beta, \quad (10)$$

где γ и β – это обучаемые параметры, которые позволяют слою BN масштабировать (изменять разброс) нормализованные данные (γ) и сдвигать (изменять среднее значение) нормализованные данные (β).

Параметры γ и β позволяют слою сохранять представляемость сети (возможность обучиться любому распределению). Если обучение покажет, что исходные ненормализованные данные были полезнее, модель сможет восстановить их масштаб и смещение с помощью этих параметров.

Финальный выходной слой представлял собой ПС с 4 нейронами, соответствующими количеству классов, и

функцией активации Softmax, которая обеспечивает вероятностное распределение принадлежности входного изображения к каждому из четырех классов.

Компиляция модели была выполнена с использованием оптимизатора Adam и начальной скоростью обучения, установленной на уровне 1×10^{-4} . В качестве функции потерь была выбрана категориальная кросс-энтропия (categorical_crossentropy), что является стандартным решением для задач многоклассовой классификации.

Процесс обучения модели управлялся с помощью ряда критериев. Критерием «лучшей» модели служит максимальное значение валидационной точности (val_accuracy), что гарантирует сохранение наиболее эффективной и обобщающей конфигурации весов. ReduceLROnPlateau динамически регулирует скорость обучения. Если валидационная функция потерь (val_loss) не

демонстрирует улучшений в течение 5 последовательных эпох (patience = 5), то скорость обучения автоматически уменьшается на 20% (factor = 0,2), при этом минимальная скорость обучения ограничена значением 1×10^{-6} . Модель прекращает процесс обучения, если валидационная функция потерь (val_loss) не улучшается в течение 10 эпох (patience = 10), после чего веса модели автоматически восстанавливаются до состояния той эпохи, на которой была достигнута лучшая производительность на валидационном наборе.

Также был реализован механизм построения тепловой карты Grad-CAM, визуализирующей область на изображении, оказавшую наибольшее влияние на классификационное решение модели. На рисунке 1 приведен пример классификации и градиентно-взвешенного картирования активации классов (Grad-CAM).

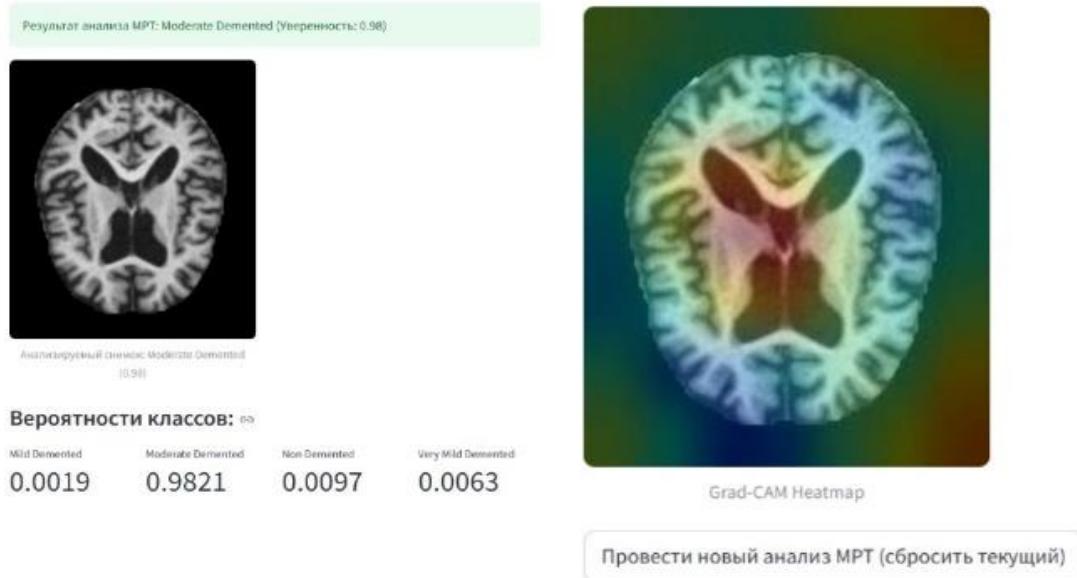


Рис. 1. Пример классификации и градиентно-взвешенного картирования активации классов (Grad-CAM)

Fig. 1. An example of classification and gradient-weighted class activation mapping (Grad-CAM)

Тепловая карта генерируется с использованием градиентной информации с последнего сверточного слоя модели и объединяется с оригинальным изображением.

Результаты и их обсуждение

На основе полученных данных о количестве ошибок первого и второго рода с помощью метрик Recall, Precision, Specificity F1-меры и AUC-ROC была проведена оценка эффективности классификации, обученной НМ по четырем классам: отсутствие признаков деменции (Non Demented), очень лёгкая деменция (Very Mild Demented), лёгкая

деменция (Mild Demented) и умеренная деменция (Moderate Demented).

Метрика оценки качества классификации Recall отражает долю правильно предсказанных положительных примеров среди всех истинных положительных и описывается по

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}}, \quad (11)$$

где TP (True Positives) – количество правильно предсказанных положительных примеров; FN (False Negatives) – количество неправильно предсказанных отрицательных примеров [17].

Рассмотрим распределение Recall по каждому классу в виде столбчатой диаграммы (рис. 2).

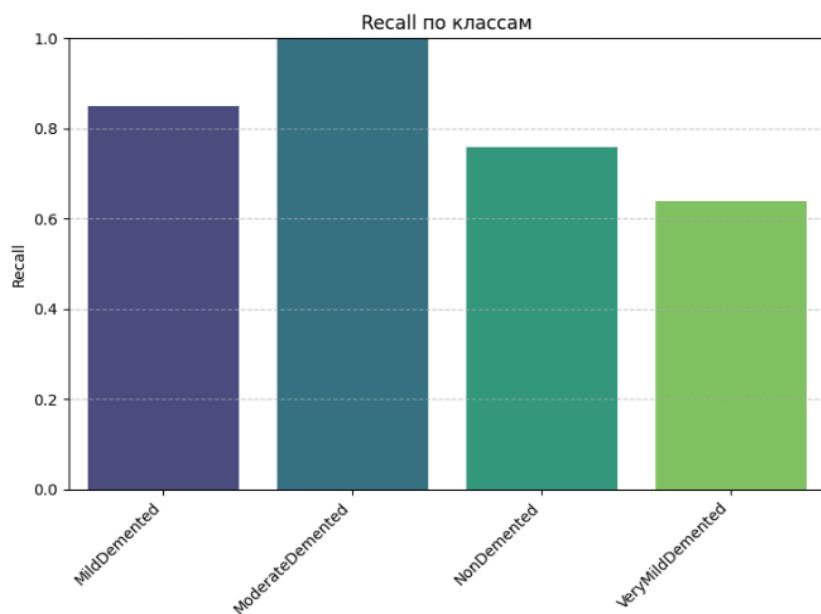


Рис. 2. Распределение Recall по каждому классу

Fig. 2. Recall distribution for each class

Метрика оценки качества классификации Specificity отражает насколько хорошо модель распознает здоровых пациентов и описывается по (12):

$$\text{Specificity} = \frac{\text{TN}}{\text{TN} + \text{FP}}, \quad (12)$$

где TN (True Negatives) – количество правильно предсказанных отрицательных примеров; FP (False Positives) – количество неправильно предсказанных положительных примеров.

Распределение Specificity по каждому классу в виде столбчатой диаграммы изображено ниже (рис. 3).

Метрика оценки качества классификации Precision отражает долю истинных положительных предсказаний среди всех случаев и описывается по (13):

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}}. \quad (13)$$

Рассмотрим распределение Precision по каждому классу в виде столбчатой диаграммы (рис. 4).

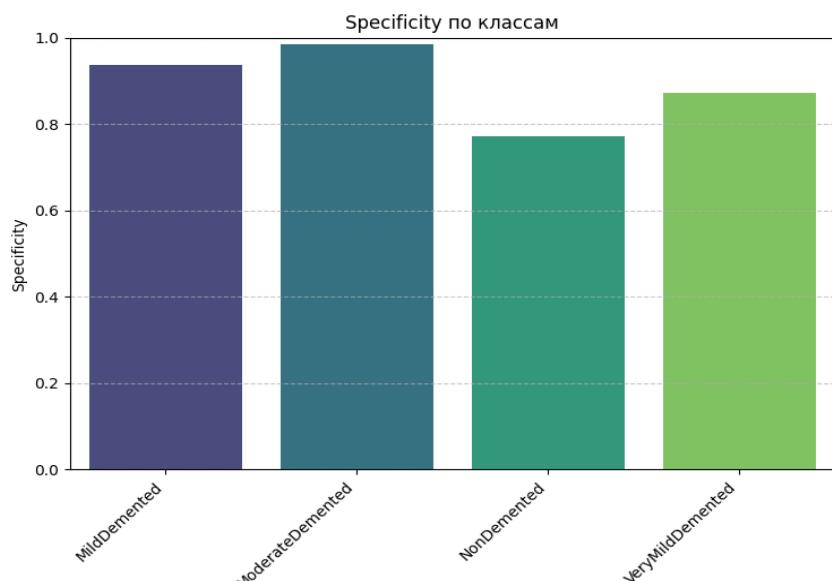


Рис. 3. Распределение Specificity по каждому классу

Fig. 3. Distribution of Specificity for each class

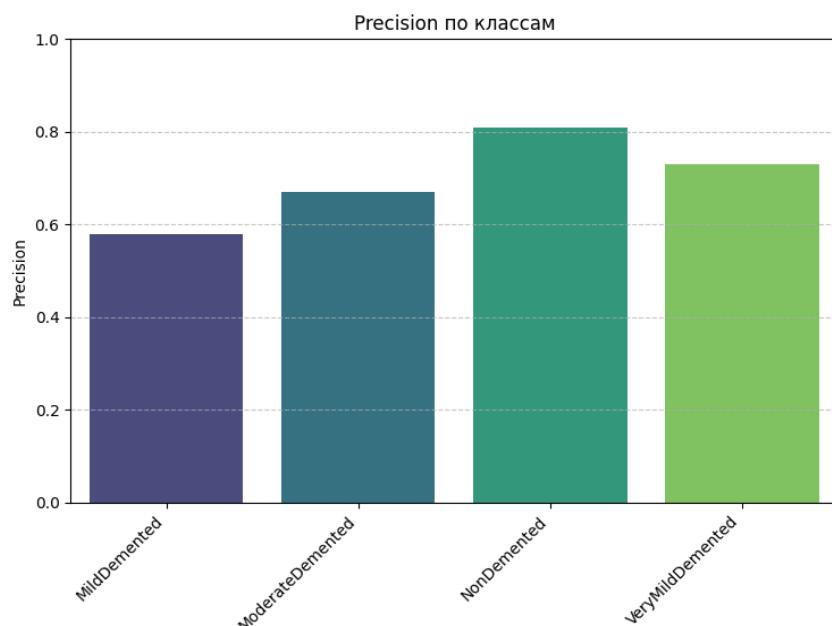


Рис. 4. Распределение Precision по каждому классу

Fig. 4. Distribution of Precision for each class

Метрика оценки качества классификации F1-мера является гармоническим средним между Precision и Recall и описывается

$$F1 = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}. \quad (14)$$

Распределение F1-меры по каждому классу в виде столбчатой диаграммы изображено ниже (рис. 5).

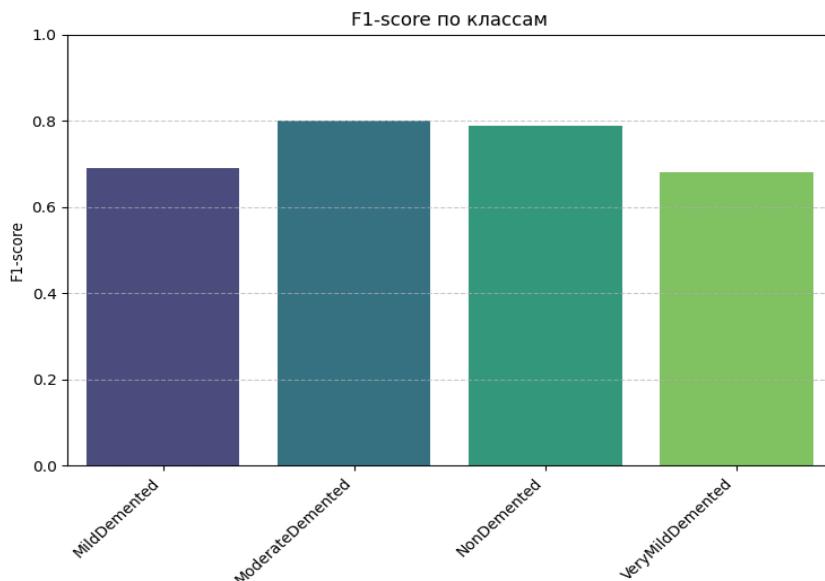


Рис. 5. Распределение F1-меры по каждому классу

Fig. 5. Distribution of F1-measures for each class

Для решения задачи применения ROC-анализа для многоклассовой классификации был применен метод one-vs-all, заключающийся в создании бинар-

ных классификаторов для каждого класса [18]. Графики полученных ROC-кривых представлены ниже (рис. 6).

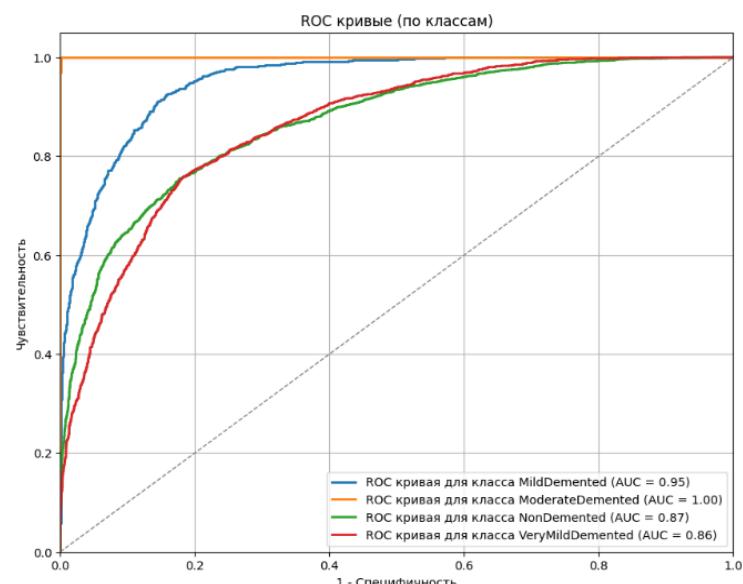


Рис. 6. Графики ROC-кривых

Fig. 6. ROC curve graphs

Проведенный анализ показал, что модель демонстрирует особенно высокую чувствительность к классу Moderate Demented – Recall и достигает значения 1,00. Это означает, что система не пропустила ни одного случая умеренной деменции в тестовой выборке. Более того, значение метрики Specificity для данного класса, также равное 1,00, свидетельствует полном отсутствии ложноположительных срабатываний. Однако анализ других классов выявил определённые ограничения. В частности, значение Recall для класса Very Mild Demented составило 0,64, а для класса Non Demented – 0,76. Это указывает на то, что модель значительно хуже распознаёт ранние или незатронутые формы когнитивного состояния. Общий анализ ROC-кривых показывает, что модель обладает высокой дискриминационной способностью для большинства классов, особенно для Moderate Demented и Mild

Demented. Более низкие значения AUC для Non Demented и Very Mild Demented могут свидетельствовать о том, что для этих классов существует большая степень перекрытия признаков, что затрудняет их точную дифференциацию. Также это может быть обусловлено низкой выраженностью признаков на МРТ-снимках и частичной схожестью структурных изменений на ранних этапах заболевания.

В таблице 1 приведены значения метрики AUC-ROC, полученные авторами [19] в ходе вышеупомянутого исследования для четырех НМ на основе СНС (GoogLeNet, DenseNet-121, GoogLeNet на основе объединения признаков, DenseNet-121 на основе объединения признаков), а также результаты, полученные в ходе описанного в данной работе исследования для модифицированной архитектуры EfficientNetB3.

Таблица 1. Значения метрики AUC-ROC для [19] и модифицированной архитектуры EfficientNetB3

Table 1. AUC-ROC metric values for [19] and modified EfficientNetB3 architecture

Класс	НМ				
	GoogLe Net	DenseNet-121	GoogLeNet на основе объединения признаков	DenseNet-121 на основе объединения признаков	модифицированная архитектура EfficientNetB3
	AUC %				
Отсутствие признаков деменции (Non Demented)	97,25	96,84	98,25	98,10	87,00
Очень лёгкая деменция (Very Mild Demented)	94,69	95,79	96,67	97,54	86,00
Легкая деменция (Mild Demented)	92,51	91,49	97,52	97,95	95,00
Умеренная деменция (Moderate Demented)	85,72	89,12	84,56	94,64	100,00

Анализ этих значений показывает, что результаты модифицированной архитектуры EfficientNetB3, несмотря на их асимметричность, являются конкурентоспособными и выгодно отличаются от подходов, описанных в ряде современных исследований. В работах, где применяются базовые архитектуры НМ, такие как VGG-16 или ResNet-18, часто сообщается о проблеме снижения точности на миноритарных или сложных для дифференциации классах. Например, в исследовании [20] модель ResNet18, хотя и показала высокую общую точность, демонстрировала заметно более низкие показатели метрики Recall для ранних стадий заболевания, что указывает на трудности с идентификацией специфических паттернов.

Выводы

В данной работе проведена оценка эффективности НМ на основе модифицированной архитектуры EfficientNetB3 с применением трансферного глубокого обучения для дифференциальной диагностики стадий болезни Альцгеймера. Результаты, продемонстрированные модифицированной архитектурой EfficientNetB3, характеризуются выраженной асимметрией и указывают на узкоспециализированный характер данной модели. С одной стороны, НМ проявила себя как эффективный инструмент для диагностики стадии умеренной деменции, продемонстрировав максимально возможное значение AUC, равное 1,00. Этот факт свидетельствует о

способности детектировать и интерпретировать комплекс патологических изменений, характерных для данной выраженной стадии заболевания. С другой стороны, эффективность классификации для остальных классов («Отсутствие деменции», «Очень лёгкая деменция» и «Лёгкая деменция») оказалась существенно ниже не только в абсолютном выражении, но и по сравнению с альтернативными подходами, основанными на комбинации признаков. Значения AUC для классов «Отсутствие деменции» (0,87), «Очень лёгкая деменция» (0,86) и «Лёгкая деменция» (0,95) являются самыми низкими среди всех представленных в таблице 1 моделей, за исключением базовых версий GoogLeNet и DenseNet-121 для некоторых классов. Такая диспропорция позволяет предположить, что в процессе обучения или проектирования архитектура приобрела высокую специфичность к признакам, релевантным именно для умеренной деменции, потенциально в ущерб чувствительности к более ранним проявлениям нейродегенеративного процесса.

Таким образом, можно сделать вывод, что основная практическая ценность модификации архитектуры EfficientNetB3 может заключаться в ее использовании в составе гетерогенных ансамблей или каскадных системах диагностики для верификации конкретной стадии БА – умеренной деменции с целью повышения общей эффективности системы. Это указывает на перспективность дальнейших исследований в

области создания узкоспециализированных архитектур, способных решать конкретные подзадачи с высокой

точностью, превосходящей универсальные, но менее сфокусированные подходы.

Список литературы

1. Особенности клинического течения нейродегенеративного заболевания головного мозга, обусловленного мутациями в гене нейрофасцита и сукцинатдегидрогеназы: клинический случай / Е. А. Ткачук, Т. А. Астахова, Л. В. Рычкова, О. В. Бугун // Медицинский совет. 2023. Т. 17, № 21. С. 122-127. <https://doi.org/10.21518/ms2023-414>
2. Bagetta G., Bano D., Scuteri D. Basic, Translational, and Clinical Research on Dementia // International Journal of Molecular Sciences. 2024. Vol. 25(13). P. 1–6. <https://doi.org/10.3390/ijms25136861>
3. Применение современных классификационных систем для комплексной диагностики болезни Альцгеймера / Я. А. Зоркина, И. О. Морозова, О. В. Абрамова [и др.] // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. 2024. Т. 124, № 1. С. 121–127. <https://doi.org/10.17116/jnevro2024124011121>
4. Возможности и перспективы метода магнитно-резонансной морфометрии в диагностике деменций / И. К. Терновых, С. В. Воробьев, С. Н. Янишевский [и др.] // Медицинский совет. 2024. Т. 18, № 12. С. 22–30. <https://doi.org/10.21518/ms2024-289>
5. Брежнев А. В., Томакова Р. А., Черных Е. В. Информационная система для прогнозирования рецидивов инфаркта миокарда, реализованная как мобильное приложение // Информационное общество. 2023. № 1. С. 116–126. https://doi.org/10.52605/16059921_2023_01_116
6. Томакова Р. А., Дзюбин И. А., Брежнев А. В. Метод и алгоритм обучения сверточной нейронной сети, пред назначенной для интеллектуальной системы распознавания меланомы // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 1. С. 65–83. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-65-83>
7. Анализ эффективности применения архитектуры U-net для классификации и сегментации глиомы на МРТ-снимках / А. В. Киселев, Е. А. Кулешова, М. О. Таныгин [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 3. С. 104–120. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-104-120>
8. Patel V. AI-Driven Alzheimer's Detection Performance Analysis of Pretrained CNN Models on MRI Data // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 2025. Vol. 13. P. 776–784. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.68354>

9. Diagnosis of Alzheimer's Disease Using CNN on MRI Data / P. Agarwal, V. Jagawat, B. Jathiswar, M. Poonkodi // Advances in Science and Technology. 2023. Vol. 124. P. 277–284. <https://doi.org/10.4028/p-z04kn>
10. Naidu G., Zuva T., Sibanda E. M. A review of evaluation metrics in machine learning algorithms // Artificial Intelligence Application in Networks and Systems: Proceedings of 12th Computer Science On-line Conference 2023. Cham: Springer, 2023.
11. Knapińska Z., Mulawka J. Patient-Tailored Dementia Diagnosis with CNN-Based Brain MRI Classification // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. <https://doi.org/10.3390/app15094652>
12. Азарнова Т. В., Поздняков Д. А. Применение методов глубокого обучения для классификации стадии Альцгеймера на основе МРТ головного мозга // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2024. № 1. С. 94–103. <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2024/1/94-103>
13. Overview of ADNI MRI / C. R. Jack, A. Arani, B. J. Borowski [et al.] // Alzheimer's Dement. 2024. Vol. 20. P. 7350–7360. <https://doi.org/10.1002/alz.14166>
14. The class imbalance problem in deep learning / K. Ghosh, C. Bellinger, R. Corizzo [et al.] // Mach Learn. 2024. Vol. 113. P. 4845–4901. <https://doi.org/10.1007/s10994-022-06268-8>
15. Image Augmentation Techniques for Mammogram Analysis / P. Oza, P. Sharma, S. Patel [et al.] // J. Imaging. 2022. Vol. 8(141). <https://doi.org/10.3390/jimaging8050141>
16. A Study of CNN and Transfer Learning in Medical Imaging: Advantages, Challenges, Future Scope / A. W. Salehi, S. Khan, G. Gupta [et al.] // Sustainability. 2023. N 15 (7). P. 5930. <https://doi.org/10.3390/su15075930>
17. Метод контроля доступа и мониторинга соблюдения техники безопасности на энергетических хозяйствах предприятий на основе конвейерной нейросетевой модели / А. В. Киселев, Н. С. Брусянцев, Е. А. Кулешова, Д. А. Ермаков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 4. С. 28–46. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-28-46>
18. Метод анализа оцифрованных рентгеновских снимков грудной клетки для дифференциальной диагностики инфекционных заболеваний дыхательной системы / И. О. Мишин, М. О. Таныгин, А. В. Киселев [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2024. № 4. С. 143–155. <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2024/4/143-155>
19. Automatic Analysis of MRI Images for Early Prediction of Alzheimer's Disease Stages Based on Hybrid Features of CNN and Handcrafted Features / A. Khalid, E. M. Senan,

K. Al-Wagih [et al.] // *Diagnostics* (Basel). 2023. Vol. 13 (9). P. 1654. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13091654>

20. Analysis of Features of Alzheimer's Disease: Detection of Early Stage from Functional Brain Changes in Magnetic Resonance Images Using a Finetuned ResNet18 Network / M. Odusami, R. Maskeliūnas, R. Damaševičius, T. Krilavičius // *Diagnostics* (Basel). 2021. Vol. 11 (6). P. 1071. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11061071>

References

1. Tkachuk E.A., Astakhova T.A., Rychkova L.V., Bugun O.V. Features of the clinical course of neurodegenerative brain disease caused by mutations in the neurofascyte and succinate dehydrogenase gene: a clinical case. *Meditinskii sovet = Medical Advice*. 2023;17(21):122–127. (In Russ.) <https://doi.org/10.21518/ms2023-414>
2. Bagetta G., Bano D., Scuteri D. Basic, Translational, and Clinical Research on Dementia. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024;25(13):1–6. <https://doi.org/10.3390/ijms25136861>
3. Zorkina Ya.A., Morozova I.O., Abramova O.V., et al. Application of modern classification systems for the complex diagnosis of Alzheimer's disease. *Zhurnal nevrologii i psichiatrii im. S. S. Korsakova = Journal of Neurology and Psychiatry named after S. S. Korsakov*. 2024;124(1):121–127. (In Russ.) <https://doi.org/10.17116/jnevro2024124011121>
4. Ternovykh I.K., Vorobyov S.V., Yanishevsky S.N., et al. Possibilities and prospects of the magnetic resonance morphometry method in the diagnosis of dementia. *Meditinskii sovet = Medical Council*. 2024;18(12):22–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.21518/ms2024-289>
5. Brezhnev A.V., Tomakova R.A., Chernykh E.V. Information system for predicting recurrence of myocardial infarction, implemented as a mobile application. *Informatsionnoe obshchestvo = Information Society*. 2023;(1):116–126. (In Russ.) https://doi.org/10.52605/16059921_2023_01_116
6. Tomakova R.A., Dzyubin I.A., Brezhnev A.V. A method and algorithm for learning a convolutional neural network designed for an intelligent melanoma recognition system. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2022;12(1):65–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-65-83>
7. Kiselev A.V., Kuleshova E.A., Tanygin M.O., et al. An analysis of the effectiveness of the U-net architecture for classification and segmentation of glioma on MRI images. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State*

University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2024;14(3):104–120. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-104-120>

8. Patel V. AI-Driven Alzheimer's Detection Performance Analysis of Pretrained CNN Models on MRI Data. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology.* 2025;13:776–784. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.68354>

9. Agarwal P., Jaga-wat V., Jathiswar B., Poonkodi M. Diagnosis of Alzheimer's Disease Using CNN on MRI Data. *Advances in Science and Technology.* 2023;124:277–284. <https://doi.org/10.4028/p-z04kn>

10. Naidu G., Zuva T., Sibanda E. M. A review of evaluation metrics in machine learning algorithms. In: *Artificial Intelligence Application in Networks and Systems: Proceedings of 12th Computer Science On-line Conference 2023.* Cham: Springer; 2023.

11. Knapińska Z., Mulawka J. Patient-Tailored Dementia Diagnosis with CNN-Based Brain MRI Classification. *Applied Sciences.* 2025;15. <https://doi.org/10.3390/app15094652>

12. Azarnova T.V., Pozdnyakov D.A. Application of deep learning methods for classification of Alzheimer's stage based on MRI of the brain. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii = Bulletin of Voronezh State University. Series: System Analysis and Information Technologies.* 2024;(1):94–103. (In Russ.) <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2024/1/94-103>

13. Jack C.R., Arani A., Borowski B.J., et al. Overview of ADNI MRI. *Alzheimer's Dement.* 2024;20:7350–7360. <https://doi.org/10.1002/alz.14166>

14. Ghosh K., Bellinger C., Corizzo R., et al. The class imbalance problem in deep learning. *Mach Learn.* 2024;113:4845–4901. <https://doi.org/10.1007/s10994-022-06268-8>

15. Oza P., Sharma P., Patel S., et al. Image Augmentation Techniques for Mammogram Analysis. *J. Imaging.* 2022;8(141). <https://doi.org/10.3390/jimaging8050141>

16. Salehi A.W., Khan S., Gupta G., et al. A Study of CNN and Transfer Learning in Medical Imaging: Advantages, Challenges, Future Scope. *Sustainability.* 2023;(15):5930. <https://doi.org/10.3390/su15075930>

17. Kiselev A.V., Brusentsev N.S., Kuleshova E.A., Ermakov D.A. A method of access control and safety monitoring at energy facilities of enterprises based on a conveyor neural network model. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2024;14(4):28–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-4-28-46>

18. Mishin I.O., Tanygin M.O., Kiselyov A.V., et al. Method of analysis of digitized chest X-rays for differential diagnosis of infectious diseases of the respiratory system.

Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii = Bulletin of Voronezh State University. Series: System Analysis and Information Technologies. 2024;(4):143–155. (In Russ.) <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2024/4/143-155>

19. Khalid A., Senan E.M., Al-Wagih K., et al. Automatic Analysis of MRI Images for Early Prediction of Alzheimer's Disease Stages Based on Hybrid Features of CNN and Hand-crafted Features. *Diagnostics (Basel)*. 2023;13(9):1654. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13091654>

20. Odusami M., Maskeliūnas R., Damaševičius R., Krilavičius T. Analysis of Features of Alzheimer's Disease: Detection of Early Stage from Functional Brain Changes in Magnetic Resonance Images Using a Finetuned ResNet18 Network. *Diagnostics (Basel)*. 2021;11(6):1071. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11061071>

Информация об авторах / Information about the Authors

Киселев Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kiselevalexey1990@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7228-0281

Alexey V. Kiselev, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kiselevalexey1990@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7228-0281

Кулешова Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: lena.kuleshova.94@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8270-564X

Elena A. Kuleshova, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Security, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: lena.kuleshova.94@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8270-564X

Таныгин Максим Олегович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tanygin@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-4099-1414

Maxim O. Tanygin, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Information Security, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: tanygin@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-4099-1414

Свинухов Павел Михайлович, аспирант кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация
e-mail: p.8848@yandex.ru,
ORCID: 0009-0005-2017-7107

Pavel R. Svinuhov, Postgraduate of the Department of Information Security, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: p.8848@yandex.ru, ORCID: 0009-0005-2017-7107

Халин Игорь Алексеевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: yur-khalin@yandex.ru,
ORCID: 0009-0004-1205-2139

Igor A. Khalin, Postgraduate of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: yur-khalin@yandex.ru, ORCID: 0009-0004-1205-2139

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-211-234>

УДК 621.391.26

Модели биоимпедансного картирования на основе эквивалентных многополюсников в системах интеллектуальной поддержки заболеваний легких

А. В. Лях¹, С. А. Филист¹, О. В. Шаталова¹✉, И. А. Башмакова¹, Л. В. Шульга¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: Shatolg@mail.ru

Abstract

Цель исследования. Отечественные и зарубежные исследования доказали, что электрический импеданс биоткани может быть использован в качестве предиктора заболеваний грудной клетки. Однако этот метод нуждается в совершенствовании, так как имеет ограничения в разрешающей способности, а также в несовершенстве моделей биоимпеданса, необходимых для формирования дескрипторов для систем машинного обучения.

Методы. В представленном исследовании предложена гибридная модель интеллектуальной системы биоимпедансных исследований, которая использует как модель машинного обучения, так и интеллект специалиста, который анализирует изображение анатомического объекта, полученное по результатам электроимпедансного картирования. Для получения изображения используется многополюсная модель импеданса биоматериала. Для построения такой модели были решены прямая и обратная задачи. В результате решения прямой задачи были получены уравнения, позволяющие определить потенциалы в узлах многополюсника при известном импедансе в его звеньях. В результате решения обратной задачи были определены импедансы звеньев многополюсника при известных потенциалах в его полюсах.

Результаты. В ходе исследования была разработана программа для построения тепловых карт распределения импеданса грудной клетки. Она объединяет в себе удобный графический интерфейс, модули математической обработки данных и наглядную визуализацию результатов. Программа позволяет медицинским специалистам быстро получить представление о распределении импеданса, что может быть полезно для диагностики и оценки текущего состояния пациента. Гибкость выбора метода интерполяции и возможность сохранения результатов делают программу ценным инструментом в медицинской практике.

Заключение. Предложено комплексное решение, объединяющее передовые методы математической обработки данных и современные подходы к созданию пользовательских интерфейсов, что дает медицинским специалистам мощный инструмент для анализа данных об импедансе грудной клетки.

Ключевые слова: заболевания легких; биоимпедансные исследования; модель биоимпеданса в виде пассивного многополюсника; электродный пояс; электроимпедансное картирование.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Финансирование: Исследования выполнены в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

© Лях А. В., Филист С. А., Шаталова О. В., Башмакова И. А., Шульга Л. В., 2025

Для цитирования: Модели биоимпедансного картирования на основе эквивалентных многополюсников в системах интеллектуальной поддержки заболеваний легких / А. В. Лях, С. А. Филист, О. В. Шаталова, И. А. Башмакова, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 4. С. 211–234. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-211-234>

Поступила в редакцию 10.10.2025

Подписана в печать 08.11.2025

Опубликована 26.12.2025

Bioimpedance mapping models based on equivalent multipole networks in intelligent lung disease support systems

Anton V. Lyakh¹, Sergey A. Filist¹, Olga V. Shatalova¹ ,
Irina A. Bashmakova¹, Leonid V. Shulga

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

 e-mail: Shatolg@mail.ru

Резюме

Purpose of research. Domestic and foreign studies have proven that the electrical impedance of biotissue can be used as a predictor of chest diseases. However, this method needs to be improved, since it has limitations in resolution, as well as in the imperfection of bioimpedance models required to form input vectors for machine learning systems.

Methods. The presented study proposes a hybrid model of an intelligent bioimpedance research system that uses both a machine learning model and the intelligence of a specialist who analyzes the image of an anatomical object obtained from the results of electrical impedance mapping. To obtain an image, a multi-pole model of biomaterial impedance is used. To construct such a model, direct and inverse problems were solved. As a result of solving the inverse problem, equations were obtained that allow one to determine the potentials at the nodes of a multi-pole with a known impedance in its links. As a result of solving the inverse problem, the impedances of the multipole links were determined with known potentials at its poles.

Results. During the study, a program was developed for constructing heat maps of the chest impedance distribution. The program is a powerful tool for visualizing the impedance distribution over the chest. It combines a convenient graphical interface, modules for mathematical data processing and clear visualization of results. The program allows medical professionals to quickly get an idea of the impedance distribution, which can be useful for diagnostics and assessing the current condition of the patient. The flexibility of choosing the interpolation method and the ability to save the results make the program a valuable tool in medical practice.

Conclusion. A comprehensive solution is proposed that combines advanced mathematical data processing methods and modern approaches to creating user interfaces, which provides medical specialists with a powerful tool for analyzing chest impedance data.

Keywords: lung diseases; bioimpedance studies; passive multipole bioimpedance model; electrode belt; electrical impedance mapping.

Conflict of interest: The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

Funding: The research was carried out as part of the implementation of the Southwestern State University development program of the strategic academic leadership program "Priority 2030".

For citation: Lyakh A.V., Filist S.A., Shatalova O.V., Bashmakova I.A., Shulga L.V. Bioimpedance mapping models based on equivalent multipole networks in intelligent lung disease support systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo*

Received 10.10.2025

Accepted 08.11.2025

Published 26.12.2025

Введение

Дифференциальная диагностика поражений легких, особенно в период эпидемического распространения респираторных инфекций, является весьма сложной задачей. При поступлении пациента в инфекционный госпиталь часто отсутствует анамнез и рентгенологи, и клиницисты делают так называемые систематические ошибки «доступности». Эти ошибки в медицине связаны с тенденцией оценивать диагнозы вслепую, в зависимости от эпидемиологической ситуации и недавно обследованных пациентов [1].

В последнее время использование методов биоимпедансного анализа для диагностики заболеваний легких стало новым направлением исследований [2]. Рассмотрение работы [3] свидетельствует о том, что было найдено больше доказательств того, что патологические образования имеют значительно отлича-

ющийся импеданс от нормальных тканей. В связи с этим получили широкое распространение методы биоимпедансной визуализации, в частности метод электроимпедансного картирования (ЭИК) [4].

ЭИК – это метод визуализации, при котором пациент или объект исследуется с помощью безопасных электрических токов. Ток подается через электроды, расположенные на поверхности мишени, и данные состоят из напряжений, измеренных на электродах, которые являются результатом линейно независимого набора схем подачи тока. При этом данные получают путем измерения напряжений, возникающих на электродах на поверхности тела, вследствие инжекции через электродную пару постоянного или переменного тока. На рисунке 1 показано, как с помощью системы ACE 1 EIT [4] в Университете штата Колорадо снимается изображение здорового человека-добровольца.

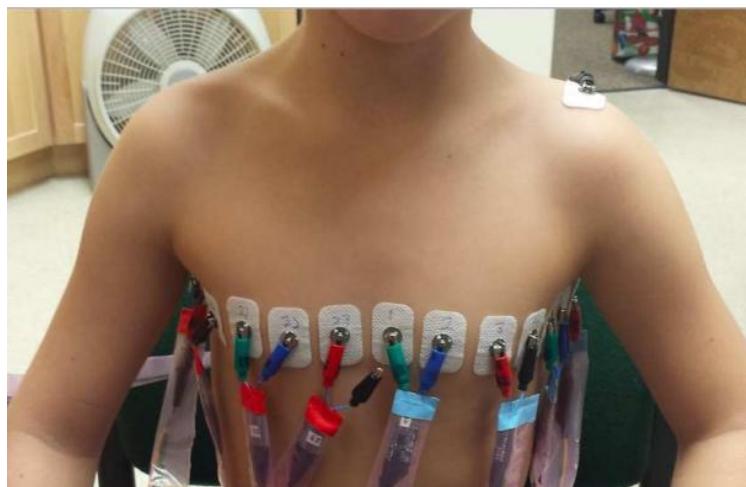


Рис. 1. Здоровый человек с 23 электродами по окружности грудной клетки [4]

Fig. 1. A healthy person with 23 electrodes around the chest [4]

Материалы и методы

Для N электродов используются $N - 1$ линейно независимых диаграмм направленности тока, которые составляют один кадр в наборе данных. Задача ЭИК моделируется уравнением проводимости Дирихле – Неймана [4]:

$$\nabla(\gamma(x, y) \cdot \nabla u(x, y)) = 0, \quad (x, y) \in \Omega, \quad (1)$$

где Ω обозначает двумерную односвязную область; u – электрический потенциал, а $\gamma = \sigma + i\omega\epsilon$ – комплекснозначная проводимость области, где σ – проводимость среды; ϵ – диэлектрическая проницаемость, а ω – времененная угловая частота приложенного к электродной паре напряжения.

Полагаем, что γ является действительным, а неизвестным параметром является проводимость. Подача известного напряжения f на границу области соответствует граничному условию Дирихле:

$$u(x, y) = f(x, y), \quad (x, y) \in \partial\Omega, \quad (2)$$

где $\partial\Omega$ – граница области.

Измерение результирующего распределения плотности тока j на границе соответствует знанию граничного условия Неймана:

$$\gamma(x, y) \frac{\partial u}{\partial v}(x, y) = j(x, y), \quad (x, y) \in \partial\Omega, \quad (3)$$

где v – внешняя нормаль к границе.

При отображении заданного распределения напряжения на границе используется распределение плотности тока. Это отображение называется отображением Дирихле – Неймана, или зависимости напряжения от плотности тока, и обозна-

чается как Λ_γ . Слабая формы отображения Дирихле – Неймана определяется как

$$\begin{aligned} \Lambda_\gamma : H^{\frac{1}{2}}(\partial\Omega) &\rightarrow H^{-\frac{1}{2}}(\partial\Omega), \\ \langle \Lambda_\gamma f, g \rangle &= \int_{\Omega} \gamma \nabla u \cdot \nabla v, \end{aligned} \quad (4)$$

где u – любая функция $H^1(\Omega)$ со следом g на границе, а v – единственное решение $H^1(\Omega)$ задачи Дирихле (1) [4].

Теоретически наши данные равны Λ_γ . На практике это обычно дискретное приближение к отображению Неймана – Дирихле, дискретное, поскольку конечное число измерений выполняется на конечном числе электродов. Если A обозначает отображение проводимости в дискретное отображение Неймана – Дирихле, то обратная задача нахождения проводимости заключается в инвертировании A для получения γ .

Основной принцип техники визуализации ЭИК заключается в подаче тока на одну пару электродов, а затем в измерении генерируемых разностей поверхностного потенциала на оставшихся электродах (рис. 2).

Измерительная система может содержать: 8 электродов (Maltron Sheffield MK 3.5, Великобритания), 16 электродов (PulmoVista, Dräger, Германия), 32 электрода (Timple Enlight, Бразилия, и Swisstom – Elisa 800 VIT, Löwenstein Medical, Германия) или даже 64 электрода (используются экспериментально), соединенных индивидуально или размещенных на эластичном пояске или нетканом жилете, размеры которых подбираются в соответствии с антропометрическими данными пациента [5].

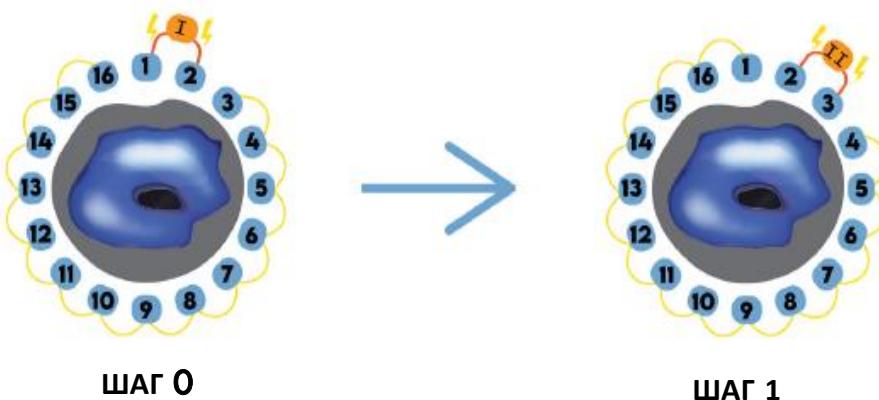


Рис. 2. Символическое изображение 16 электродов, размещенных на груди, и метода их измерения с течением времени: пара электродов, размещенных рядом друг с другом, генерирует электрический ток, который затем измеряется всеми другими парами электродов [5]

Fig. 2. Symbolic representation of 16 electrodes placed on the chest and the method of measuring them over time: a pair of electrodes placed next to each other generates an electric current, which is then measured by all other pairs of electrodes [5]

Чтобы минимизировать нарушения импеданса конституцией легких, электроды ЭИК должны быть размещены в межреберье IV–V [5]. В противном случае результаты ЭИК могут быть совершенно неспецифичными по сравнению с классическими методами визуализации легких посредством компьютерной томографии (КТ). Пара соседних электродов излучает ток средней частоты (например, 5 мА), в то время как остальные электроды измеряют изменения этого напряжения в точке прилипания к коже груди. Затем ток излучается другой парой электродов, а результатирующее напряжение измеряется всеми остальными электродами (рис. 2). В настоящее время самая популярная, 16-электродная измерительная система получает 16 профилей из 13 измерений напряжения (в течение одного цикла тока), генерируя 208 числовых шаблонов, образуя матрицу одного отдела грудной клетки.

Использование фильтрации устраняет большинство возникающих артефактов (например, связанных с деятельностью сердца). Комбинация всех профилей напряжения указывает на место измененного импеданса. Все полученные таким образом измерения импеданса интегрируются процессором устройства и представляются в виде пикселей экрана с определенной интенсивностью цвета (рис. 3).

Таким образом, каждый пиксель на матрице соответствует определенной области, которая оценивается в реальном времени. Полученное изображение имеет поперечный размер, но изображение накапливает измерения с сегмента грудной клетки 7...10 см. Легкие оцениваются с помощью послойной или квадрантной интерпретации изображения (области интереса – ROI). Таким образом, процентная доля отдельных областей в распределении дыхательного объема легко представляется.

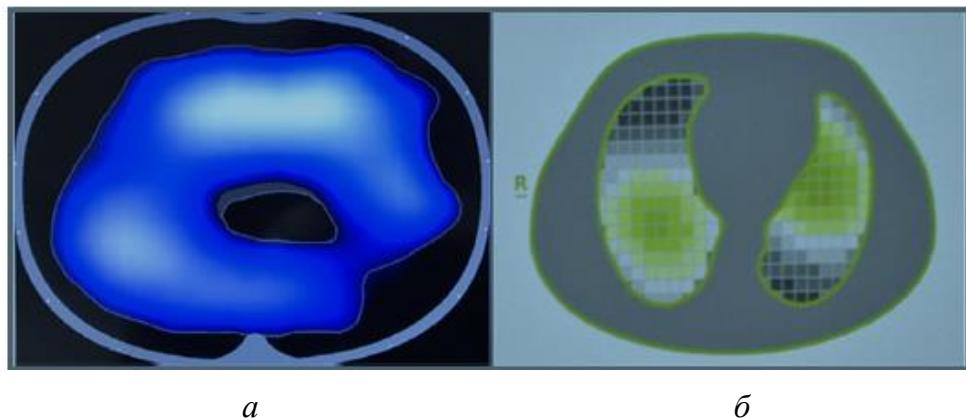


Рис. 3. Пиксели различной интенсивности, представляющие изменения импеданса в отдельных областях легких: *а* – светло-голубой цвет – хорошо вентилируемые области, темно-синий – плохо вентилируемые области; *б* – зеленые пиксели – хорошо вентилируемые области, серые – плохо вентилируемые области

Fig. 3. Pixels of varying intensity representing changes in impedance in certain areas of the lungs: *a* – light blue color – well-ventilated areas, dark blue – poorly ventilated areas; *b* – green pixels – well-ventilated areas, gray – poorly ventilated areas

Дизайн вида экрана представлен в каудально-краниальной оси (как при классических КТ-сканированиях), поэтому правая сторона экрана представляет собой левую сторону пациента [5]. Чтобы понять клиническую природу ЭИК, важно понимать, что каждое изображение, полученное в реальном времени, относится к эталонному изображению, выбранному оператором устройства. Зарегистрированные изменения импеданса представляют собой разницу между импедансом эталонного изображения и текущего изображения. При ограниченной или отсутствующей области вентиляции устройства ЭИК изменения импеданса нет и изображение ЭИК не изменяется. Увеличение аэрации легких, вплоть до состояний патологической гиперинфляции, регистрируется как картина увеличения импеданса с изменением цвета. Кроме того, региональное воспаление легких или образование экссудативных поражений обычно

изменяют регионарный импеданс (в зависимости от типа устройства). Это касается, в частности, критических состояний, таких как острый респираторный дистресс-синдром (ARDS). Это вызвано изменением биомеханических свойств и возможным утолщением альвеолярной перегородки, что затрудняет прохождение электрического тока.

На основе ЭИК можно формировать трехмерные изображения, чтобы точно определить не только доброкачественный или злокачественный статус морфологического образования, но и ее местоположение. Для этого используется несколько электродных поясов. На рисунке 4, *а* представлено схематическое изображение грудной клетки с горизонтальными сечениями, иллюстрирующее размещение трех электродных поясов, на рисунке 4, *б* – схема размещения электродов на электродном пояссе при использовании восьми электродов для формирования отведений.

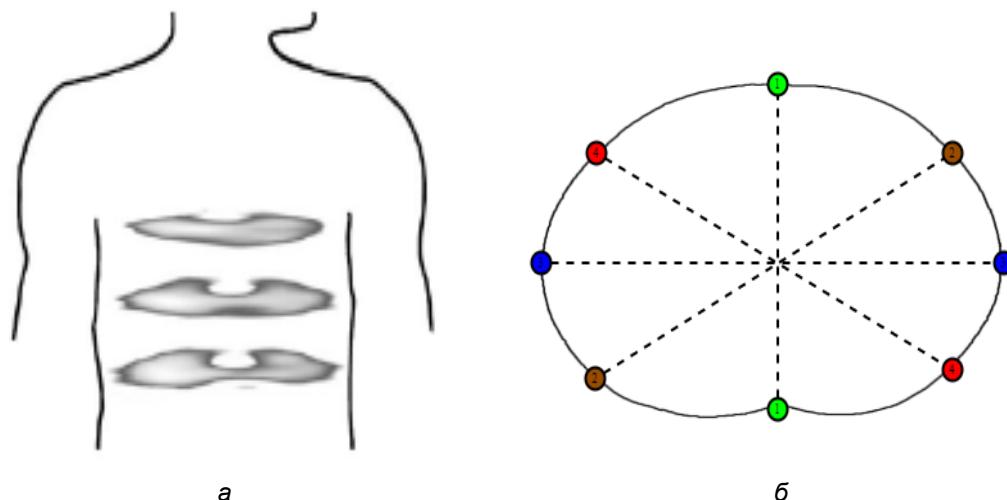


Рис. 4. Топология размещения электродов на грудной клетке в трех проекциях

Fig. 4. Topology of electrode placement on the chest in three projections

Использование 3D ЭИК может не только улучшить локализацию опухоли для облегчения биопсии, но и помочь отсеять ложные положительные результаты, вызванные артефактами, такими как повреждения кожи, кости и т. д. Однако для этого необходима система ЭИК с достаточно высоким пространственным разрешением и высокой воспроизводимостью. Для достижения этого необходимо увеличение числа независимых измерений и использование надежных средств контакта электродов с кожей, необходимо опробовать различные схемы сбора данных и разработать новые алгоритмы реконструкции. Многочастотный подход может еще больше повысить точность обнаружения [6].

Таким образом, научно-техническая задача исследования состоит в том, чтобы

разработать инструментарий, который можно систематически использовать для обеспечения успешного получения и классификации результатов биоимпедансного анализа (БИА).

Модель биоимпеданса грудной клетки

БИА – это неинвазивный метод диагностики состава тела, основанный на измерении электрического сопротивления биологических тканей. Он широко используется в медицине, диетологии, спортивной науке и фитнесе для оценки количества жировой и мышечной массы, жидкости в организме и общего метаболического состояния¹.

Биоимпедансный анализ основан на свойстве биологических тканей по-разному проводить электрический ток [7]. Мышечная ткань, содержащая много

¹ Пат. 2504328 Российская Федерация, МПК А 61 В 5/053 (2006.01). Устройство для контроля анизотропии электрической проводимости биотканей / Томакова Р. А., Филист С. А.,

Кузьмин А. А., Кузьмина М. Н., Алексенка В. А., Волков И. И. № 2012128471/14; заявл. 06.07.12; опубл. 20.01.14, Бюл. № 2. 12 с.

воды и электролитов, обладает низким сопротивлением (импедансом), тогда как жировая ткань, являясь плохим проводником, имеет высокий импеданс [8]. Принцип работы БИА заключается в следующем:

- через тело пропускают слабый электрический ток (обычно 50–800 мА, частота 5–1000 кГц);
- измеряется сопротивление тканей (импеданс);
- на основе полученных данных и антропометрических показателей (рост, вес, возраст, пол) рассчитываются дескрипторы для классификации медицинского риска (МР) [9].

Целью данного исследования является усовершенствование методов БИА для диагностики заболеваний легких. Дескрипторы для классификаторов МР формируются на основе многополюсных моделей с последующим

определением параметров этих моделей [10]. Такой подход позволяет наряду с анализом МР на выходе классификатора анализировать биоимпедансное изображение сечения биообъекта, получаемое посредством множества квазиортогональных отведений. Тем самым мы включаем в процесс принятия диагностического решения зрительный анализатор человека [11] и получаем возможность интегрировать объективное и субъективные решения в гибридном классификаторе [12].

Дескрипторы для классификаторов МР формировались путем использования результатов импедансной спектроскопии в двух квазиортогональных отведениях (рис. 5), посредством которой получают две амплитудно-фазочастотные характеристики (АФЧХ), на основании которых получаем модели биоимпеданса [10].

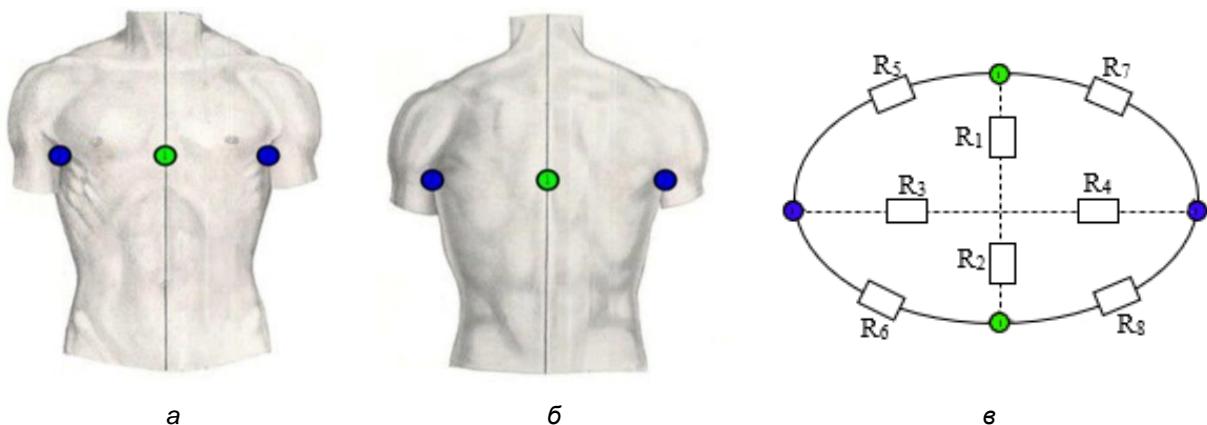


Рис. 5. Трехмерные проекции (а – е), иллюстрирующие принцип формирования квазиортогональных отведений

Fig. 5. Three-dimensional projections (a – e) illustrating the principle of forming quasi-orthogonal leads

В [13] были предложены модели биоимпеданса, полученные на основе экспериментально построенных АФЧХ.

Эти модели позволили получать векторы дескрипторов для классификаторов МР. На основе АФЧХ строились

параметрические модели двухполюсников, состоящие из последовательно соединенных звеньев Войта [14]. Параметры звеньев Войта определялись из решений системы нелинейных алгебраических уравнений, полученных из экспериментальных АФЧХ отведений посредством использования итерационных алгоритмов [15]. Параметры этих моделей использовались как дескрипторы для обучаемых классификаторов МР [16].

Используя подход к построению биоимпедансной модели (рис. 5, в), можем предложить модель биоматериала грудной клетки в виде многополюсника. При этом полюсов у многополюсника будет столько, сколько электродов содержит электродный пояс (рис. 5, а и 5, б). Используя рисунок 5, можем ввести понятие квазиортогонального отведения. При этом под отведением будем понимать электрическую цепь, содержащую электродную пару, выбранную из электродного пояса. Если оси двух электродных пар взаимно перпендикулярны, то такие отведения назовем квазиортогональными.

Если имеется метод или алгоритм, согласно которому мы можем определить параметры импеданса в многополюсной модели (рис. 5, в), то их величины можно будет использовать в качестве дескрипторов для обучаемой нейронных сетей, выполняющих функции классификатора МР. Более того,

если эллипс (рис. 5, в) рассматривать в качестве области определения некоторой двумерной функции значений проводимости $Y(x,y)$, а вычисленные значения проводимостей Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 рассматривать в качестве экспериментальных отсчетов этой функции, то, задавшись некоторой априорной информацией и методом аппроксимации экспериментальных значений проводимостей внутри эллипса, можем получить распределение проводимостей по площади всего эллипса, а затем визуализировать это распределение, например, в виде тепловой карты.

В контексте данного исследования предстоит работать с моделью (рис. 6), в которой содержится минимальное количество полюсов и минимальное количество отведений: два ортогональных отведения, а в общей сложности шесть отведений (в схеме содержится восемь электродов-полюсов и 5 узлов, но стоит отметить, что к одному узлу мы не имеем доступа, поэтому рассматривается только четыре узла).

Для определения распределений проводимости в таком многополюснике будем последовательно подключать источник ЭДС E к паре электродов, а разности потенциалов снимать с других пар электродов. Метод определения проводимостей эквивалентного многополюсника разобьём на две задачи. Первую задачу назовем прямой, вторую – обратной.

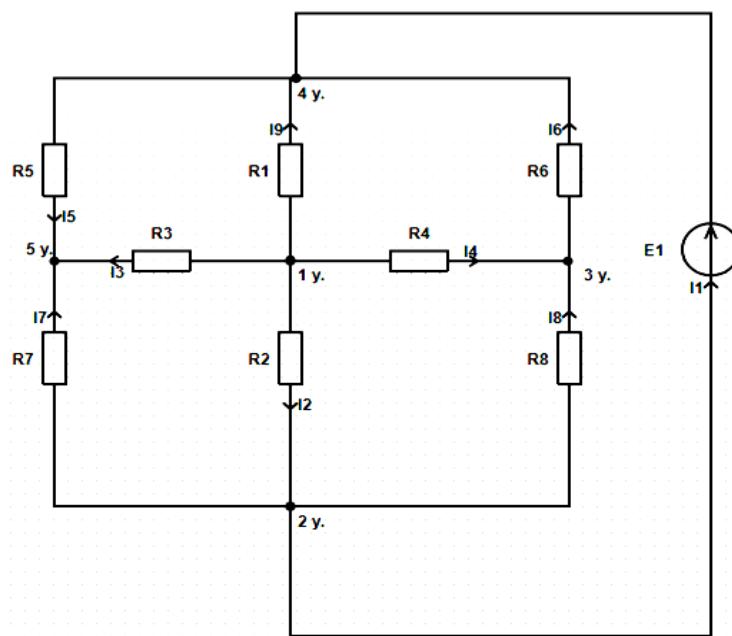


Рис. 6. Пример электрической схемы многополюсника с пятью полюсами и двумя квазиортогональными отводами

Fig. 6. Example of an electrical circuit of a multipole device with five poles and two quasi-orthogonal leads

Решение прямой задачи

Прямая задача заключается в определении неизвестных потенциалов в узлах многополюсника при известных потенциалах в одном из отводов (потенциалов в двух узлах) и значений всех сопротивлений многополюсника. Этот этап иллюстрирует рисунок 6. Каждое подключение источника ЭДС к одному из отводов позволяет составить систему линейных алгебраических уравнений, которые могут быть получены, например, согласно методу узловых потенциалов [17]. Число систем алгебраических уравнений L определяется числом отводов, доступных в многополюснике, т. е. это число сочетаний из числа полюсов N в многополюснике по два:

$$L = C_N^2 = \frac{N!}{2!(N-2)!}. \quad (5)$$

В каждой системе алгебраических уравнений число уравнений составит

$N - 2$. Здесь надо отметить, что узел 1 на рисунке 6 мы не учитываем, поэтому N всегда четное. Хотя теоретически потенциал в этом узле может быть вычислен при допущениях, представленных на рисунке 6. При экспериментальных исследованиях мы не имеем к нему доступа, поэтому уравнение с ним в системах уравнений при решении обратной задачи не принимаем во внимание.

Метод узловых потенциалов (метод узловых напряжений) – один из ключевых аналитических методов расчёта электрических цепей. Он широко применяется в электротехнике, радиотехнике и энергетике для определения токов и напряжений в сложных разветвлённых цепях. В отличие от метода контурных токов он основан на анализе потенциалов узлов схемы относительно выбранной базовой точки. Как раз потенциалы узлов и необходимо посчитать в рамках решения прямой задачи, именно

поэтому при проведении расчётов выбор пал именно на этот метод [17].

Метод базируется на первом законе Кирхгофа (законе токов), который гласит, что алгебраическая сумма токов в узле равна нулю. Основные шаги метода [17]:

1. Выбор базового узла (обычно с нулевым потенциалом).

2. Составление уравнений для остальных узлов на основе законов Ома и Кирхгофа.

3. Решение системы линейных уравнений относительно потенциалов.

Преимущество метода узловых потенциалов заключается в том, что по сравнению с другими методами (к примеру, с методом контурных токов) может получиться значительно меньше уравнений, но к недостаткам также можно отнести то, что требуется выбрать базовый узел (тот узел, которые мы заземлим), а это может сильно повлиять на удобство дальнейших расчётов, если будет выбран не совсем удачный узел (на исход это не повлияет, но может сделать расчёты более длительными).

Метод узловых потенциалов основан на первом законе Кирхгофа, согласно которому сумма токов в узле φ равна

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0, \quad (6)$$

где n – число звеньев, примыкающих к узлу φ.

Ток в звене i определяется согласно закону Ома для участка цепи:

$$I_i = \frac{\varphi_i - \varphi + E}{R_i} + J_i, \quad (7)$$

где E_i и J_i – ЭДС и ток в i -м звене, соответственно; R_i – сопротивление i -го звена; φ – потенциал в узле; φ_i – потенциалы в узлах соответствующих звеньев.

Если обозначить проводимости ребер (звеньев) как $Y_i = 1/R_i$, то уравнение для узла φ примет вид

$$\varphi \sum_{i=1}^n Y_i - \sum_{i=1}^n (\varphi_i \cdot Y_i) = \sum_{i=1}^n (E_i + Y_i \cdot J_i). \quad (8)$$

Уравнение (8) получено исходя из предположения, что все источники тока и ЭДС направлены в сторону рассматриваемого узла. Если какой-либо источник направлен в противоположную сторону, его ЭДС или ток необходимо взять с обратным знаком. Записав последнее уравнение для каждого узла цепи, кроме базового, получим систему уравнений для узловых потенциалов. С помощью метода узловых потенциалов можно получить полную информацию о напряжениях во всех узлах и токах во всех рёбрах (ветвях) заданной электрической цепи.

Решение прямой задачи в пакете MathCad

MathCad – это мощная программная среда, предназначенная для выполнения инженерных и научных расчетов. Одной из ключевых возможностей программы является решение систем линейных и нелинейных уравнений, что и послужило основой того, почему именно MathCad удобно использовать в ходе решения задачи исследования [18].

Так как в ходе решения стало ясно, что предстоит иметь дело только с линейными системами, то используем функцию `lsolve` (рис. 7).

Напряжение между узлами 5 и 3

Примем потенциал узла 5 равным нулю (заземлим)

$$\varphi_5 := 0 \quad \varphi_3 := 100$$

Составляем уравнения для потенциалов остальных узлов.

Уравнения для узла №1

$$\varphi_1 \cdot \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_1} \right) - \varphi_2 \cdot \frac{1}{R_2} - \varphi_5 \cdot \frac{1}{R_3} - \varphi_3 \cdot \frac{1}{R_4} - \varphi_4 \cdot \frac{1}{R_1} = 0$$

Уравнения для узла №2

$$\varphi_2 \cdot \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_8} \right) - \varphi_1 \cdot \frac{1}{R_2} - \varphi_5 \cdot \frac{1}{R_7} - \varphi_3 \cdot \frac{1}{R_8} = 0$$

Уравнения для узла №4

$$\varphi_4 \cdot \left(\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_1} \right) - \varphi_5 \cdot \frac{1}{R_5} - \varphi_3 \cdot \frac{1}{R_6} - \varphi_1 \cdot \frac{1}{R_1} = 0$$

$$A := \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_2} \right) & -\frac{1}{R_2} & -\frac{1}{R_1} \\ -\frac{1}{R_2} & \left(\frac{1}{R_8} + \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_2} \right) & 0 \\ -\frac{1}{R_1} & 0 & \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_5} \right) \end{bmatrix}$$

$$B := \begin{pmatrix} \frac{\varphi_5}{R_3} + \frac{\varphi_3}{R_4} \\ \frac{\varphi_5}{R_7} + \frac{\varphi_3}{R_8} \\ \frac{\varphi_5}{R_5} + \frac{\varphi_3}{R_6} \end{pmatrix} \quad x := \text{Isolve}(A, B)$$

Итоговые значения узловых потенциалов:

$$\varphi_1 := x_0 \quad \varphi_2 := x_1 \quad \varphi_4 := x_2$$

$$\varphi_1 = 56.803 \quad \varphi_2 = 61.21 \quad \varphi_3 = 100 \quad \varphi_4 = 45.734 \quad \varphi_5 = 0$$

Рис. 7. Пример решения линейной системы алгебраических уравнений с помощью функции Isolve, когда напряжение установлено между узлами 3 и 5

Fig. 7. Example of solving a linear system of algebraic equations using the Isolve function when the voltage is set between nodes 3 and 5

Данная функция имеет решение системы уравнения следующего вида:

$$A \cdot X = B, \quad (9)$$

где A – матрица коэффициентов; X – вектор неизвестных; B – вектор свободных членов.

Также стоит отметить, что для каждой из 6 систем необходимо составить уравнения потенциалов узлов, которых мы не знаем. Например, определения потенциалов в узлах приложении возбуждающего напряжения между узлом 3 и узлом 5, лист MathCad представлены на рисунке 7.

В конечном итоге было составлено 6 систем уравнений, аналогичных показанным на рисунке 7, которые рассчитывают узловые потенциалы в четырёх узлах. Все необходимые значения сопротивлений задаются в самом начале документа MathCad.

Таким образом, используя предложенную биоимпедансную модель, для классификации биоматериала можем построить модель машинного обучения (МО). В качестве дескрипторов МО используем параметры биоимпедансной модели, полученные в результате решения обратной задачи. При этом в качестве сырых данных используем показатели напряжений, измеренных в соответствующих отведениях приложении к одному из отведений известного напряжения.

Решение обратной задачи

В БИА необходимо разработать биоимпедансную модель живой системы, отражающую ее электрические свойства. Блок генерации дескрипторов отвечает за построение параметрической биоимпедансной модели. Эта модель представлена в виде электрической цепи, которая может быть как пассивным, так и активным многополюсником. Одна из возможных моделей

такого двухполюсника показана на рисунке 5, в. Модель состоит из совокупности соединенных компонентов, например, звеньев Войта. Связь Войта представляет собой пассивный двухполюсник, состоящий из резистора и конденсатора, соединенных параллельно.

Для решения обратной задачи необходимо получить экспериментальные данные, к которым относятся потенциалы в узлах эквивалентного многополюсника. Таким образом, необходимо решить системы алгебраических уравнений (8) относительно неизвестных проводимостей Y_i при известных потенциалах в узлах эквивалентного многополюсника.

Рассмотрим сначала функциональную схему экспериментальной установки (рис. 8), предназначенной для получения данных для решения обратной задачи.

Управление подключением отведений осуществляется блоком управления (БУ) посредством подачи команд управления на адресные входы мультиплексоров и демультиплексоров. Число отведений в многополюснике определяется согласно формуле (5). Но нам необходимо получить столько уравнений, сколько неизвестных параметров в эквивалентном многополюснике. Если не разбивать проводимости в квазиортогональных отведениях на две (рис. 6), то число параметров, а следовательно, и число уравнений также определяются по формуле (5). Демультиплексоры DMX1 и DMX2 формируют соответствующие отведения путем

подключения полюсов источника ЭДС E к соответствующим электродам электродного пояса. В результате между электродами формируются электрические проводимости, которые необходимо определить на основе экспериментальных данных, представляющих

собой напряжения (потенциалы), снимаемые с выхода инструментального усилителя, входами которого управляют мультиплексоры MX1 и MX2. На рисунке 8 показана ситуация, когда ко входу инструментального усилителя подключены электроды c и d .

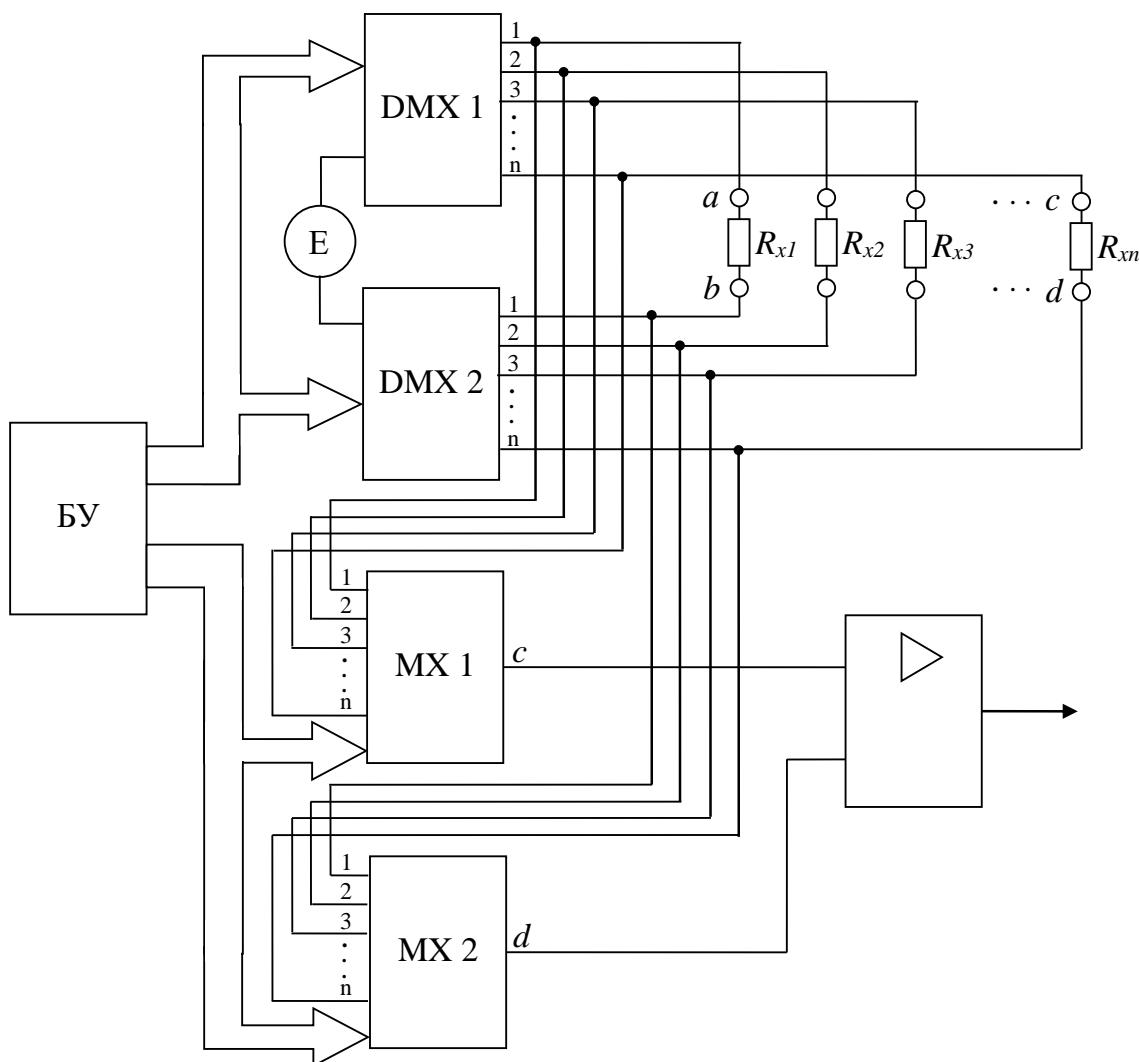


Рис. 8. Функциональная схема экспериментальной установки для решения обратной задачи

Fig. 8. Functional diagram of the experimental setup for solving the inverse problem

Каждому сочетанию выходов демультиплексоров соответствует $N - 2$ сочетаний выходов мультиплексоров (в этом случае надо рассматривать не сочетания электродов, а число полюсов

в эквивалентном многополюснике). Например, при $N = 4$ мы имеем согласно (5) шесть отведений, каждому из которых соответствуют два уравнения. Таким образом, получаем двенадцать

уравнений для определения восьми неизвестных. В силу частого отсутствия точного решения переопределённых систем (при ненулевом шуме) на практике принято вместо него отыскивать вектор, наилучшим образом удовлетворяющий всем уравнениям, т. е. минимизирующий норму невязки системы в какой-нибудь степени. Этой проблеме посвящён отдельный раздел математической статистики – регрессионный анализ. Наиболее часто минимизируют квадрат отклонений от оцениваемого решения. Для этого применяют так называемый метод наименьших квадратов.

Поскольку данная задача является обратной по отношению к типовым задачам расчета электрических цепей, то и уравнения будут иметь другой вид [19]. Таким образом, зная пять значений потенциалов и ток, текущий через схему, мы можем составить системы уравнений для каждого подключения по закону Кирхгофа о сумме токов в узле. Общий вид уравнения для i -го узла будет следующим:

$$\sum G_{ij}(\varphi_i - \varphi_j) = I_i, \quad (10)$$

где $G_{ij} = \frac{1}{R_{ij}}$ – проводимость между узлами i и j ; I_i – алгебраическая сумма токов, подводимых к узлу i (включая ток источника).

В итоге для многополюсника с четырьмя полюсами имеем 30 уравнений, 8 ограничительных неравенств и 8 неизвестных. Для нахождения неизвестных значений воспользуемся блоком MathCAD Given...Find().

Результаты и их обсуждение

Для визуализации биоимпедансной картины сечения грудной клетки было создано соответствующее программное обеспечение (ПО). Сущность алгоритма визуализации, который реализует разработанное ПО, состоит в том, что из электрических сопротивлений в отведениях (пример – рис. 5, в) формируется исходная матрица, у которой рекуррентно, путем интерполяции расширяется размерность вплоть до достижения априорно заданного размера. Затем матрица расширенной размерности представляется в виде изображения тепловой карты.

Интерфейсное окно программы построения тепловой карты состоит из двух основных частей: области ввода данных слева и области отображения графика справа. В левой части находятся восемь полей для ввода значений импеданса, выпадающий список для выбора метода интерполяции и две кнопки: «Применить» и «Сохранить изображение». В правой части изначально будет отображаться шаблонное изображение грудной клетки, если файл default_picture.png доступен (рис. 9). Если файл не найден, появится сообщение об ошибке, но программа продолжит работу.

Для построения тепловой карты необходимо заполнить все восемь полей ввода числами. Поля соответствуют следующим зонам:

- R1, R2, R3, R4 – основные сектора грудной клетки;
- r12, r23, r34, r41 – промежуточные зоны между основными секторами.

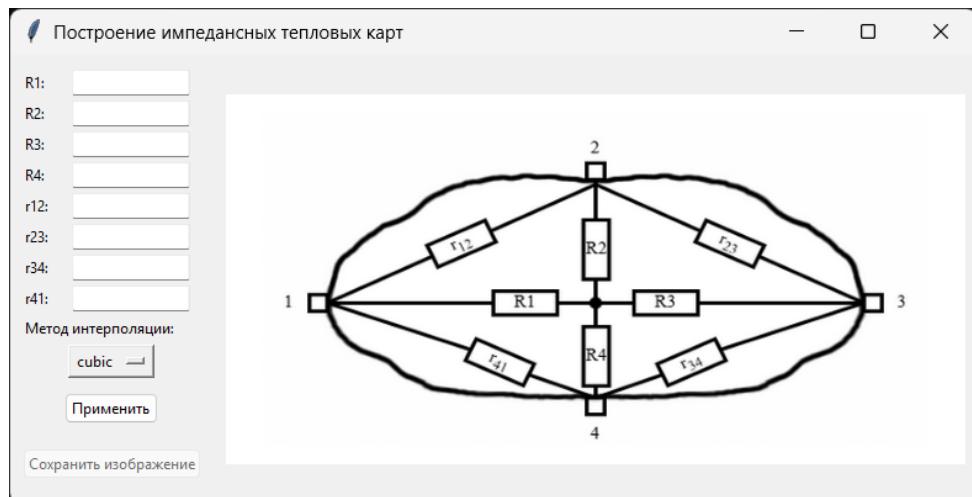


Рис. 9. Окно программы после запуска

Fig. 9. Program window after launch

Если какое-либо поле останется пустым или будет содержать не числовое значение, при нажатии на кнопку «Применить» появится сообщение об ошибке.

Программа предлагает несколько методов интерполяции, доступных через выпадающий список: – cubic, – gaussian, – inverse_multiquadric, – linear, – multiquadric, – quintic, – thin_plate.

По умолчанию выбран метод cubic. Рекомендуется экспериментировать с разными методами, чтобы выбрать наиболее подходящее отображение данных.

После заполнения всех полей и выбора метода пользователь должен нажать кнопку «Применить». Программа выполнит следующие действия:

1. Проверит корректность введённых данных.
2. Добавит четыре дополнительных значения импеданса, рассчитанные как среднее арифметическое между парами уже введённых значений.

3. Сгенерирует «зоны влияния» вокруг каждой точки, создав сетку точек внутри квадратов с центрами в заданных координатах.

4. Выполнит интерполяцию данных с использованием метода RBF и построит тепловую карту.

Тепловая карта будет наложена на изображение шаблона грудной клетки, а справа появится цветовая шкала, отражающая уровень импеданса в килоомах (рис. 10).

После построения тепловой карты кнопка «Сохранить изображение» станет активной. Пользователю надо нажать её, чтобы запустить диалоговое окно сохранения, где можно выбрать место и формат сохранения файла (например, PNG или JPEG). По умолчанию предлагается расширение .png. Если сохранение прошло успешно, появится уведомление с путём к файлу. В случае ошибки будет выведено соответствующее сообщение.

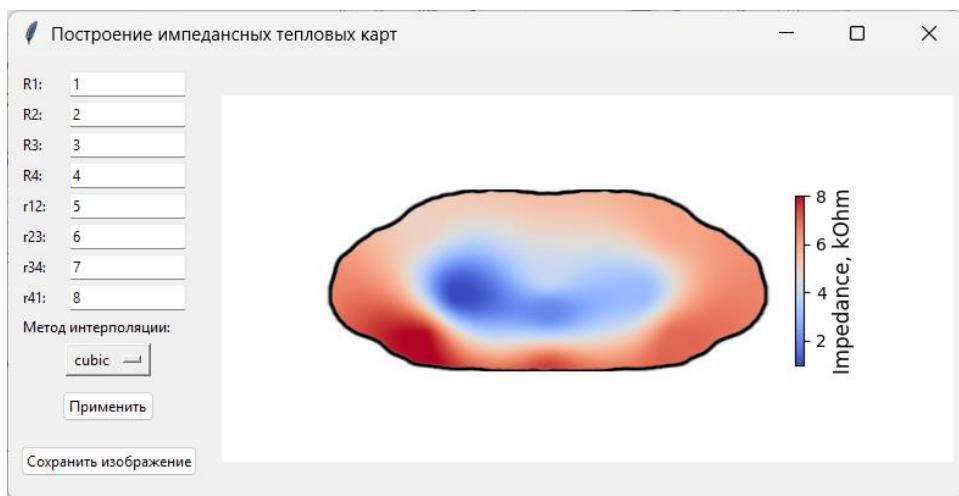


Рис. 10. Интерфейс программы с заполненными полями ввода и построенной тепловой картой

Fig. 10. Program interface with filled input fields and a built heat map

Программа предусматривает обработку следующих ошибок:

- отсутствие файла шаблона грудной клетки (thermal_map_template.png) или файла по умолчанию (default_picture.png);
- некорректный ввод данных (пустые поля или нечисловые значения);
- ошибки при сохранении изображения (например, недоступная директория или формат файла).

В каждом случае выводится понятное сообщение, помогающее пользователю исправить проблему.

Для тестирования программы были использованы следующие значения импеданса: – R1: 25, – R2: 26, – R3: 27, – R4: 22, – r12: 33, – r23: 36, – r34: 29, – r41: 31.

Эти данные позволяют увидеть наглядное распределение импеданса по грудной клетке с чётко выраженной градиентной тепловой картой (рис. 11).

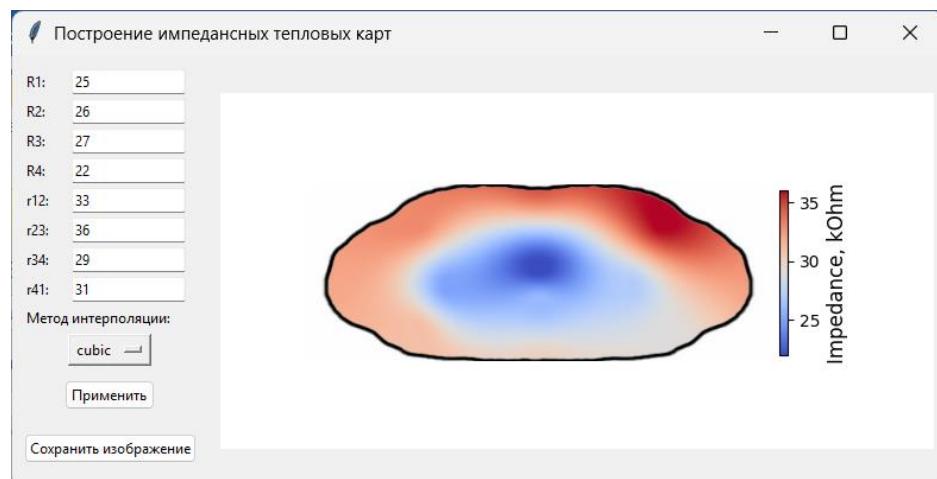


Рис. 11. Пример тепловой карты с тестовыми данными

Fig. 11. Example of a heat map with test data

Для корректной работы программы необходимы следующие библиотеки Python: – tkinter, – matplotlib, – numpy, – scipy, – pillow.

Также должны быть доступны файлы шаблонов: `thermal_map_template.png` и `default_picture.png`.

Выводы

1. Предложена модель биоимпеданса грудной клетки, представленная в виде эквивалентного многополюсника. Для определения параметров модели эквивалентного многополюсника предложен двухэтапный алгоритм. На первом этапе методом узловых потенциалов составляются системы линейных алгебраических уравнений для определения потенциалов в узлах многополюсника при подаче напряжения на одну из пар полюсов эквивалентного многополюсника. На втором этапе решается обратная задача, заключающаяся в определении параметров эквивалентного многополюсника посредством решения системы линейных алгебраических уравнений, полученных при последовательной подаче напряжения на отведения эквивалентного многополюсника и измерении напряжений в других отведениях эквивалентного многополюсника. В среде MathCad разработано программное обеспечение для решения прямой задачи.

2. Разработана функциональная схема экспериментальной установки для получения сырых данных для решения обратной задачи. Предложена регрессионная модель для решения обратной задачи в среде MathCad.

3. В ходе исследования была разработана программа для построения тепловых карт распределения импеданса грудной клетки. Эта программа представляет собой мощный инструмент для визуализации распределения импеданса по грудной клетке. Она объединяет в себе удобный графический интерфейс, точную математическую обработку данных и наглядную визуализацию результатов. Программа позволяет медицинским специалистам быстро получить представление о распределении импеданса, что может быть полезно для диагностики и оценки состояния пациента. Гибкость выбора метода интерполяции и возможность сохранения результатов делают программу ценным инструментом в медицинской практике.

Таким образом, предложено комплексное решение, объединяющее передовые методы математической обработки данных и современные подходы к созданию пользовательских интерфейсов, что дает медицинским специалистам мощный инструмент для анализа данных об импедансе грудной клетки.

Список литературы

1. Бородулина Е. А., Яковлева Е. В., Вдоушкина Е. С. Проблемы диагностики заболеваний легких при выявлении симптома «матового стекла» (обзор литературы) // Медицинский альянс. 2022. Т. 10, № 3. С. 54-62. <https://doi.org/10.36422/23076348-2022-10-3-54-62>

2. Мультимодальный классификатор медицинского риска на основе многоэлектродного биоимпедансного преобразователя / А. В. Серебровский, Н. А. Корсунский, А. В. Лях, В. Н. Мишустин, О. В. Шаталова, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 3. С. 121–143. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-121-143>

3. Модели импеданса биоматериала для формирования дескрипторов в интеллектуальных системах диагностики инфекционных заболеваний / А. В. Мирошников, Н. С. Стадниченко, О. В. Шаталова, С. А. Филист // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8, № 4. С. 1–14. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.018>

4. Mueller J.L., Siltanen S. The D-bar method for electrical impedance tomography – demystified // Inverse Problems. 2020. Vol. 36, N 9. P. 093001. <https://doi.org/10.1088/1361-6420/aba2f5>

5. Electrical impedance tomography as a tool for monitoring mechanical ventilation. An introduction to the technique / D. Maciejewski, Z. Putowski, M. Czok, Ł. J. Krzych // Advances in Medical Sciences. 2021. Vol. 66, N 2. P. 388–395. <https://doi.org/10.1016/j.advms.2021.07.010>

6. Классификации биологических объектов на основе многомерного биоимпедансного анализа / А. В. Мирошников, О. В. Шаталова, Н. С. Стадниченко, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 29–49.

7. Шаталова О. В. Интеллектуальные системы мониторинга медицинских рисков с учетом биоимпедансных исследований: монография / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2020. 356 с.

8. Технологии биоимпедансной спектроскопии в системах поддержки принятия решений при диагностике социально значимых заболеваний / О. В. Шаталова, Н. С. Стадниченко, М. А. Ефремов, И. А. Башмакова, А. В. Лях, А. В. Серебровский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 148–174. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-148-174>

9. Биоимпедансная спектроскопия в классификаторах функционального состояния органов и систем человека, построенных на основе гибридных технологий искусственного интеллекта / О. В. Шаталова, А. В. Серебровский, Н. С. Стадниченко, А. Ю. Новоселов, А. В. Лях // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2023. Т. 22, № 2. С. 100–113. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.22.2.015>

10. Модели импеданса биоматериала для формирования дескрипторов в интеллектуальных системах диагностики инфекционных заболеваний / А. В. Мирошников, Н. С. Стадниченко, О. В. Шаталова, С. А. Филист // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8, № 4. С. 1–14. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.018>
11. Advanced bioimpedance analysis for infectious disease risk assessment via neural network classifiers / S. Filist, R. T. Al-Kasasbeh, T. G. Gevorkyan, O. M. Al-Hababbeh, O. Shatalova, A. Telfah, E. Starkov, N. A. Korenevskiy, A. Shaqadan, M. B. Namazov, I. Maksim, M. S. Mousa // Physical and Engineering Sciences in Medicine. 2025. Vol. 48. P. 1167–1183. <https://doi.org/10.1007/s13246-025-01575-5>
12. Мультимодальный классификатор риска рака молочной железы на основе анализа импеданса биоматериала / А. В. Серебровский, О. В. Шаталова, А. В. Лях, И. А. Халин, И. А. Башмакова, З. У. Протасова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 2. С. 142–159. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-142-159>
13. Метод классификации функционального состояния живых систем на основе рекуррентных моделей Войта / А. В. Мирошников, О. В. Шаталова, А. Ю. Новоселов, Н. С. Стадниченко, А. В. Серебровский // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии ФРЭМЭ'2022: труды XV Международной научной конференции с научной молодежной школой им. И. Н. Спиридонова (28–30 июня 2022 г.). Владимир-Сузdal: Графика, 2022. С. 296–300.
14. Шаталова О. В. Итерационная многопараметрическая модель биоимпеданса в экспериментах *in vivo* // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 1 (30). С. 26–38.
15. Филист С. А., Шаталова О. В., Ефремов М. А. Гибридная нейронная сеть с макрослоями для медицинских приложений // Нейрокомпьютеры. Разработка и применение. 2014. № 6. С. 35–39.
16. Использование гибридных нейросетевых моделей для многоагентных систем классификации в гетерогенном пространстве информативных признаков / А. Г. Курочкин, В. В. Жилин, С. Е. Суржикова, С. А. Филист // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2015. № 3 (31). С. 85–95.
17. Клюшников О. И., Степанов А. В. Теоретические основы электротехники. Екатеринбург: Российский государственный профессионально-педагогический университет, 2006. Т. 7. С. 60–63.
18. Очков В. Ф. Mathcad 14 для студентов и инженеров: русская версия. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 512 с.

19. Denisov A. The Inverse Problem for the Heat Equation in the Case of a Small Heat Capacity Coefficient // Computational Mathematics and Modeling. 2025. N 34 (3). P. 208–216. <https://doi.org/10.1007/s10598-025-09612-4>

References

1. Borodulina E.A., Yakovleva E., Vdoushkina E.S. Problems in diagnostics of lung diseases when detecting the ground glass symptom (literature review). *Meditinskij al'yans = Medical Alliance*. 2022;10(3):54–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.36422/23076348-2022-10-3-54-62>
2. Serebrovsky A.V., Korsunsky N.A., Lyakh A.V., Mishustin V.N., Shatalova O.V., Shulga L.V. Multimodal classifier of medical risk based on a multielectrode bioimpedance converter. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoje priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(3):121–143. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-121-143>
3. Miroshnikov A.V., Stadnichenko N.S., Shatalova O.V., Filist S.A. Biomaterial impedance models for the formation of descriptors in intelligent systems for the diagnosis of infectious diseases. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(4):1–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.018>
4. Mueller J.L., Siltanen S. The D-bar method for electrical impedance tomography – demystified. *Inverse Problems*. 2020;36(9):093001. <https://doi.org/10.1088/1361-6420/aba2f5>
5. Maciejewski D., Putowski Z., Czok M., Krzych Ł.J. Electrical impedance tomography as a tool for monitoring mechanical ventilation. An introduction to the technique. *Advances in Medical Sciences*. 2021;66(2):388–395. <https://doi.org/10.1016/j.advms.2021.07.010>
6. Miroshnikov A.V., Shatalova O.V., Stadnichenko N.S., Shulga L.V. Classifications of biological objects based on multi-dimensional bioimpedance analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering* 2020;10(3/4):29–49. (In Russ.)
7. Shatalova O.V. Intellektual'nye sistemy monitoringa meditsinskikh riskov s uchetom bioimpedansnyh issledovaniy. Intelligent systems for monitoring medical risks considering bioimpedance studies. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet, 2020. P. 356. (In Russ.)
8. Shatalova O.V., Stadnichenko N.S., Efremov M.A., Bashmakova I.A., Lyakh A.V., Serebrovsky A.V. Technologies of bioimpedance spectroscopy in decision support systems

for the diagnosis of socially significant diseases. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2023;13(4):148–174. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-148-174>

9. Shatalova O.V., Serebrovsky A.V., Stadnichenko N.S., Novoselov A.Yu., Lyakh A.V. Bioimpedance spectroscopy in classifiers of the functional state of human organs and systems based on hybrid artificial intelligence technologies. *Sistemnyy analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems.* 2023;22(2):100–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.22.2.015>

10. Miroshnikov A.V., Stadnichenko N.S., Shatalova O.V., Filist S.A. Biomaterial impedance models for the formation of descriptors in intelligent systems for the diagnosis of infectious diseases. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technologies.* 2020;8(4):1–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.018>

11. Filist S., Al-Kasasbeh R.T., Gevorkyan T.G., Al-Hababbeh O.M., Shatalova O., Tel-fah A., Starkov E., Korenevskiy N.A., Shaqadan A., Namazov M.B., Maksim I., Mousa M.S. Advanced bioimpedance analysis for infectious disease risk assessment via neural network classifiers. *Physical and Engineering Sciences in Medicine.* 2025;48:1167–1183. <https://doi.org/10.1007/s13246-025-01575-5>

12. Serebrovsky A.V., Shatalova O.V., Lyakh A.V., Khalin I.A., Bashmakova I.A., Protasova Z.U. Multimodal breast cancer risk classifier based on biomaterial impedance analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2024;14(2):142–159. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-142-159>

13. Miroshnikov A.V., Shatalova O.V., Novoselov A.Yu., Stadnichenko N.S., Serebrovskiy A.V. Method for classification of the functional state of living systems based on recurrent voigt models. In: *Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii PhREME'2022: trudy XV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii s nauchnoy molodezhnoy shkoloy im. I.N. Spiridonova = Physics and Radioelectronics in Medicine and Ecology PhREME'22: XV International Scientific Conference with Scientific Youth School named after I.N. Spiridonov, 28–30 June 2022. Vladimir-Suzdal: Grafika; 2022. P. 296–300. (In Russ.)*

14. Shatalova O.V. Iteration multiparameter model of bioimpedance in vivo experiments. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2019;9(1):26–38. (In Russ.)

15. Filist S.A., Shatalova O.V., Efremov M.A. Hybrid neural network with macro-layers for medical applications. *Neyrokompyutery. Razrabotka i primenie = Journal Neurocomputers*. 2014;6:35–39. (In Russ.)
16. Kurochkin A.G., Zhilin V.V., Surzhikova S.E., Filist S.A. Use of hybrid neural network models for mnogoagentny systems of classification in heterogeneous space of informative signs. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Control and High Technologies*. 2015;(3):85–95. (In Russ.)
17. Klyushnikov O.I., Stepanov A.V. Theoretical foundations of electrical engineering. Vol. 7. Ekaterinburg: Rossiiskii gosudarstvennyi professional'no-pedagogicheskii universitet; 2006. P. 60–63. (In Russ.)
18. Ochkov V.F. Mathcad 14 for students and engineers: Russian version. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg; 2009. 512 p. (In Russ.)
19. Denisov A. The Inverse Problem for the Heat Equation in the Case of a Small Heat Capacity Coefficient. *Computational Mathematics and Modeling*. 2025;(34):208–216. <https://doi.org/10.1007/s10598-025-09612-4>

Информация об авторах / Information about the Authors

Лях Антон Викторович, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru, ORCID: 0009-0008-6217-2840

Филист Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры биомедицинской инженерии Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: SFilist@gmail.com, Researcher ID: O-4610-2015, ORCID: 0000-0003-1358-671X

Шаталова Ольга Владимировна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: shatolg@mail.ru, Researcher ID: C-3687-2015, ORCID: 0000-0002-0901-9272

Anton V. Lyakh, Postgraduate at the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru, ORCID: 0009-0008-6217-2840

Sergey A. Filist, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor at the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: SFilist@gmail.com, Researcher ID: O-4610-2015, ORCID: 0000-0003-1358-671X

Olga V. Shatalova, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor at the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: shatolg@mail.ru, Researcher ID: C-3687-2015, ORCID: 0000-0002-0901-9272

Башмакова Ирина Алексеевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электроэнергетики и электротехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Irina92_2010@mail.ru, ORCID: 0009-0001-1402-7349

Шульга Леонид Васильевич, доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры охраны труда и окружающей среды, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sfilist@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6793-7362

Irina A. Bashmakova, Candidate of Sciences (Engineering), Senior Lecturer at the Department of Electrical Power Engineering and Electrical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russia Federation, e-mail: Irina92_2010@mail.ru, ORCID: 0009-0001-1402-7349

Leonid V. Shulga, Doctor of Sciences (Medical), Professor, Professor at the Department of Occupational Safety and Environment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sfilist@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6793-7362

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-235-248>

УДК 621.391.26

Рационализация диагностики и прогнозирования исходов черепно-мозговой травмы по биомаркерам крови

А. С. Лысенко¹, Н. М. Агарков^{2,3}✉, Т. И. Якунченко^{2,3}, С. Н. Гонтарев^{2,3},
Д. Р. Шмарова³, А. А. Шорохова³

¹ Курская городская больница № 1 имени Н. С. Короткова
ул. Садовая, д. 40, г. Курск 305004, Российская Федерация

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, д. 85, г. Белгород 308015, Российская Федерация

³ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: vitalaxen@mail.ru

Резюме

Цель исследования – рационализация диагностики и прогнозирования исходов черепно-мозговой травмы по биомаркерам крови.

Методы. У 125 обследованных пациентов зрелого (45–59 лет) и пожилого (60–74 лет) возраста с ЧМТ лёгкой и средней степени тяжести изучены показатели крови на 12 сутки после её получения. Общий анализ крови проводился автоматическим анализатором на аппарате GS480A (Китай), биохимический анализ крови – на аппарате THERMO FISHER SCIENTIFIC KoneLab Prime 30 (ООО «Фарма», Россия). При использовании однофакторного регрессионного анализа из изученных 13 показателей крови выявлена диагностическая и прогностическая значимость для 11 переменных. Для оценки качества прогностической многомерной регрессионной модели использовался ROC-анализ (Receiver Operator Characteristic), а для оценки дискриминации модели использовалась площадь под кривой (AUC).

Результаты. При многофакторном регрессионном анализе в нескорректированной модели сохранили диагностическую и прогностическую значимость все 11 переменных с наибольшей величиной коэффициента β для содержания в крови калия, лейкоцитов, глюкозы, лимфоцитов и соотношения глюкозы к калию. Вместе с тем в скорректированную по полу и возрасту многофакторную регрессионную модель вошли только 7 переменных и с учётом наиболее значимых разработана прогностическая модель $y = 7,561 + 2,652x_1 - 2,848x_2 + 2,458x_3 + 2,573x_4$. Прогностическая ценность созданной модели показала, что AUC составляет 0,725 ($p = 0,0012$) с чувствительностью 62,875%, специфичностью 71,896%.

Заключение. Созданная модель обладает достаточным качеством и может использоваться для диагностики и прогнозирования неблагоприятных исходов черепно-мозговой травмы.

Ключевые слова: прогнозирование; рационализация диагностики; черепно-мозговая травма; регрессионный анализ; показатели крови.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

© Лысенко А. С., Агарков Н. М., Якунченко Т. И., Гонтарев С. Н., Шмарова Д. Р., Шорохова А. А., 2025

Для цитирования: Рационализация диагностики и прогнозирования исходов черепно-мозговой травмы по биомаркерам крови / А. С. Лысенко, Н. М. Агарков, Т. И. Якунченко, С. Н. Гонтарев, Д. Р. Шмарова, А. А. Шорохова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 4. С. 235–248. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-235-248>

Поступила в редакцию 14.10.2025

Подписана в печать 12.11.2025

Опубликована 26.12.2025

Rationalization of diagnosis and prediction of traumatic brain injury outcomes by blood biomarkers

Anastasia S. Lysenko¹, Nikolay M. Agarkov^{2,3}✉, Tatyana I. Yakunchenko^{2,3},
Sergey N. Gontarev^{2,3}, Diana R. Shmarova³, Anastasia A. Shorokhova³

¹ Kursk City Hospital No. 1 named after N. S. Korotkov
40 Sadovaya Str., Kursk 305004, Russian Federation

² Belgorod State National Research University
85 Pobedy Str., Belgorod 308015, Russian Federation

³ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: vitalaxen@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is rationalization of diagnosis and prediction of traumatic brain injury outcomes by blood biomarkers.

Methods. In 125 examined mature (45–59 years old) and elderly (60–74 years old) patients with mild and moderate TBI, blood counts were studied on the 12th day after receiving it. A general blood test was performed using an automatic analyzer on a GS480A device (China), and a biochemical blood test was performed on a THERMO FISHER SCIENTIFIC Konelab Prime 30 device (Pharma, Russia). Using a one-factor regression analysis of the studied 13 blood parameters, diagnostic and prognostic significance for 11 variables was revealed. To assess the quality of the predictive multivariate regression model, ROC analysis (Receiver Operator Characteristic) was used, and the area under the curve (AUC) was used to assess the discrimination of the model.

Results. In the multifactorial regression analysis in the uncorrected model, all 11 variables with the highest beta coefficient for blood levels of potassium, leukocytes, glucose, lymphocytes, and glucose-to-potassium ratio retained diagnostic and prognostic significance. At the same time, the gender- and age-adjusted multifactorial regression model included only 7 variables, and taking into account the most significant ones, a predictive model was developed $y = 7,561 + 2,652x_1 - 2,848x_2 + 2,458x_3 + 2,573x_4$. The prognostic value of the created model showed that the AUC is 0,725 ($p = 0,0012$) with a sensitivity of 62,875% and a specificity of 71,896%.

Conclusion. The created model is of sufficient quality and can be used to diagnose and predict adverse outcomes of traumatic brain injury.

Keywords: forecasting; rationalization of diagnosis; traumatic brain injury; regression analysis; blood counts.

Conflict of interest: The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

For citation: Lysenko A.S., Agarkov N.M., Yakunchenko T.I., Gontarev S.N., Shmarova D.R., Shorokhova A.A. Rationalization of diagnosis and prediction of traumatic brain injury outcomes by blood biomarkers. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoje priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(4):236–249. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-4-236-249>

Received 14.10.2025

Accepted 12.11.2025

Published 26.12.2025

Введение

Черепно-мозговая травма (ЧМТ) становится серьезной проблемой общественного здравоохранения из-за неуклонного роста ежегодного числа пострадавших, которое составляет около 50 млн человек. ЧМТ включает в себя разнородный набор функциональных, анатомических и гистологических изменений, вызванных воздействием внешних физических сил, оказывающих чрезмерное давление на мозг [1]. Это, в свою очередь, в конечном итоге приводит к апоптозу и некрозу нейронов или глиальных клеток, разрыву кровеносных сосудов, тромбозу, нарушению гематоэнцефалического барьера, переломам черепа и / или разрывам мозговых оболочек. Этот тип внезапного первичного повреждения при ЧМТ может проявляться в виде ряда патофизиологических характеристик, включая макроскопические очаговые или диффузные поражения, гематомы, кровоизлияния, ушибы головного мозга и / или диффузные повреждения аксонов, которые могут быть необратимыми [2]. Кроме того, отсроченное повреждение нейронов может быть вызвано вторичными нарушениями, связанными с несколькими молекулярными, биохимическими и нейровоспалительными процессами, которые могут длиться от нескольких минут до

нескольких месяцев после первого механического воздействия. Характер первичной или вторичной патологии зависит от механизма получения травмы, наличия сопутствующих травм и заболеваний, а также от эффективности лечения. Эти вышеупомянутые события обычно сопровождаются сильной локальной и / или системной иммунной активацией [3]. Таким образом, воздействие на определенные иммунологические пути может оказаться полезным для разработки будущих стратегий лечения ЧМТ.

Первичное повреждение головного мозга может включать в себя повреждение внутричерепных структур, объемные эффекты, а также дисрегуляцию нейронов, глии и / или сосудов головного мозга. Вторичное повреждение головного мозга, напротив, зависит от состояния активации нескольких взаимосвязанных патофизиологических путей. Популяции клеток, которые либо подвергаются апоптозу, либо испытывают значительные функциональные нарушения, определяются степенью активации этих сложных путей и процессов [4].

При ЧМТ могут активироваться различные метаболические и / или молекулярные каскады, что в конечном итоге приводит к повышению внутриклеточной концентрации кальция и натрия,

дисфункции митохондрий, выработке свободных радикалов, нарушению окислительного фосфорилирования, активации апоптоза, накоплению нейромедиаторов и увеличению расхода энергии.

Провоспалительные, противовоспалительные цитокины и хемокины могут выделяться нейронами, глиальными клетками и системными иммунными клетками, которые также могут играть важную роль во внутриклеточной передаче патологических сигналов [2]. Механические процессы, такие как объёмные травматические повреждения, могут вызывать отёк головного мозга, ишемию, повторные кровоизлияния, нарушение церебральной ауторегуляции, снижение церебрального перфузионного давления, повышение внутричерепного давления. Системные процессы могут приводить к различным состояниям, в т. ч. к снижению мозгового кровотока, нарушениям электролитного баланса, гипергликемии, гипогликемии, гипоксии, анемии, гипо- или гиперкапнии, нарушениям кислотно-щелочного баланса и судорогам [3].

Ранняя и точная диагностика ЧМТ по клиническим признакам, данным нейровизуализации представляют ценную диагностическую и прогностическую информацию, но не всегда выполняется из-за состояния больного и других причин [5]. Это побуждает специалистов и исследователей искать более доступные биомаркеры крови, позволяющие повысить точность диагностики и прогнозирования исходов у пациентов с ЧМТ [6]. К таким биомаркерам относятся показатели крови, но прогностическая ценность их остаётся противоречивой и недостаточно изученной и не

применялся многофакторный подход и многомерный регрессионный анализ к оценке прогностической значимости.

Цель исследования – рационализация диагностики и прогнозирования исходов ЧМТ по биомаркерам крови.

Материалы и методы

Обследовано 125 пациентов зрелого (45–59 лет) и пожилого (60–74 лет) возраста с лёгкой и средней степенью тяжести ЧМТ на 12 сутки после её получения. Диагностика ЧМТ осуществлялась в соответствии с Клиническими рекомендациями «Очаговая травма головного мозга» [7] и по результатам компьютерной томографии.

Кроме того, при диагностике ЧМТ лёгкой и средней степени выполнялись общий и биохимический анализ крови. Общий анализ крови проводился автоматическим анализатором на аппарате GS480A (Китай), биохимический анализ крови – на аппарате THERMO FISHER SCIENTIFIC Konelab Prime 30 (ООО «Фарма», Россия). Из указанных лабораторных исследований проведена выкопировка таких показателей, как содержание в крови лейкоцитов, нейтрофилов, лимфоцитов, базофилов, эозинофилов, моноцитов, гемоглобина, эритроцитов, глюкозы, калия, натрия, креатинина и мочевой кислоты. Контрольная группа составила 108 пациентов зрелого и пожилого возраста без ЧМТ и с сопоставимой соматической патологией.

При статистическом анализе с применением программы Statistica 17.0 проведен однофакторный регрессионный анализ и переменные со значением $p < 0,01$ были в дальнейшем включены в модель многофакторного регрессионного анализа

для определения независимых предикторов прогнозирования исходов ЧМТ. В качестве независимых переменных при выполнении однофакторного регрессионного анализа нами использовались показатели абсолютного содержания в крови: лейкоцитов, нейтрофилов, лимфоцитов, базофилов, эозинофилов, моноцитов, гемоглобина, эритроцитов, глюкозы, калия, натрия, креатинина и мочевой кислоты. Независимые переменные с ненулевыми коэффициентами были отобраны и впоследствии проанализированы с помощью многофакторного регрессионного анализа для выявления потенциальных прогностических факторов. В качестве зависимой переменной в данном случае нами рассматривался неблагоприятный исход ЧМТ – длительность заболевания более 4 месяцев. Для оценки качества прогностической многомерной регрессионной модели использовался ROC-анализ

(Receiver Operator Characteristic), а для оценки дискриминации модели использовалась площадь под кривой (AUC). Статистическая значимость установлена на $p < 0,01$ для всех переменных.

Результаты и их обсуждение

Оценка достоверности различий показателей крови в двух сравниваемых группах показала, что у пациентов получивших ЧМТ, статистически значимо выше содержание многих показателей. Сказанное относится к лейкоцитам, нейтрофилам, лимфоцитам, тромбоцитам, креатинину, мочевой кислоте и соотношению глюкозы к калию. При этом среди пациентов с ЧМТ более высоким оказалось содержание в крови лейкоцитов – в 1,58 раза, лимфоцитов – в 1,41 раза, тромбоцитов – в 1,35 раза и соотношение глюкозы к калию. Превышение других показателей среди ранее названных оказалось менее существенным.

Таблица 1. Содержание изученных показателей крови у пациентов с ЧМТ ($M \pm SD$)

Table 1. The content of the studied blood parameters in patients with TBI ($M \pm SD$)

Показатель крови	Пациенты без ЧМТ	Пациенты с ЧМТ	p
Лейкоциты, $10^9/\text{л}$	$5,62 \pm 1,08$	$8,86 \pm 2,49$	0,001
Нейтрофилы, $10^9/\text{л}$	$3,28 \pm 0,92$	$4,15 \pm 1,38$	0,0092
Эозинофилы, $10^9/\text{л}$	$0,13 \pm 0,06$	$0,16 \pm 0,19$	0,3862
Базофилы, $10^9/\text{л}$	$0,04 \pm 0,09$	$0,03 \pm 0,11$	0,5469
Лимфоциты, $10^9/\text{л}$	$1,85 \pm 0,24$	$2,61 \pm 0,38$	0,0015
Гемоглобин, г/л	$132,43 \pm 3,49$	$115,60 \pm 4,15$	0,0024
Эритроциты, $10^{12}/\text{л}$	$4,86 \pm 1,13$	$3,94 \pm 0,98$	0,0028
Тромбоциты, $10^9/\text{л}$	$218,62 \pm 5,79$	$295,17 \pm 6,45$	0,0019
Креатинин, мкмоль/л	$60,23 \pm 2,85$	$69,48 \pm 3,07$	0,0038
Мочевая кислота, мкмоль/л	$334,81 \pm 8,24$	$372,35 \pm 10,25$	0,0025
Глюкоза, г/л	$5,42 \pm 0,79$	$4,08 \pm 0,52$	0,0014
Калий, мкмоль/л	$3,68 \pm 0,63$	$1,93 \pm 0,21$	0,0012
Соотношение глюкозы к калию	$1,47 \pm 0,19$	$2,11 \pm 0,45$	0,0022

Наряду с этим среди пациентов, получивших ЧМТ, статистически значимо было ниже содержание эритроцитов, гемоглобина, глюкозы и калия. Максимально низкий уровень среди данных параметров крови установлен для содержания калия.

Таблица 2. Нескорректированные модели по данным многофакторного регрессионного анализа показателей крови

Table 2. Unadjusted models based on multivariate regression analysis of blood parameters

Показатель крови	Величина коэффициента β	95%-ной доверительный интервал	p
Лейкоциты	2,937	2,714–3,265	0,0025
Нейтрофилы	2,548	2,441–2,809	0,0019
Лимфоциты	2,842	2,578–3,114	0,0008
Гемоглобин	–1,104	0,815–1,267	0,0136
Эритроциты	–2,158	1,902–2,436	0,0037
Тромбоциты	2,105	1,854–2,312	0,0041
Креатинин	1,141	0,918–1,246	0,0028
Мочевая кислота	1,033	0,848–1,124	0,0034
Глюкоза	–2,775	2,502–3,151	0,0019
Калий	–3,361	3,127–3,628	0,0021
Соотношение глюкозы к калию	2,819	2,603–3,154	0,0038
Константа	9,485	–	–

Все использованные показатели крови в многофакторном регрессионном анализе сохранили статистическую значимость и свидетельствуют о наибольшем значении для прогнозирования исходов ЧМТ содержания ионов калия, лейкоцитов, лимфоцитов и глюкозы.

Корректировка показателей крови по полу и возрасту и обработка их многофакторным регрессионным анализом позволила получить скорректированные модели (табл. 3), в которых величины коэффициентов β многофакторной

Показатели крови со статистически значимым различием в дальнейшем включены в многофакторный регрессионный анализ, позволивший разработать нескорректированные модели (табл. 2).

регрессии для многих переменных уменьшились, а некоторые утратили статистическую значимость. В скорректированных по полу и возрасту многофакторных регрессионных моделях снизились величины коэффициентов β для лейкоцитов, нейтрофилов, лимфоцитов, глюкозы, калия, соотношения глюкозы к калию. Одновременно такие переменные, как гемоглобин, мочевая кислота, креатинин, утратили статистическую значимость и не вошли в скорректированные многофакторные модели.

Таблица 3. Скорректированные по полу и возрасту многофакторные регрессионные модели**Table 3.** Gender and age-adjusted multifactorial regression models

Показатель крови	Величина коэффициента β	95%-ный доверительный интервал	p
Лейкоциты	2,485	2,123–2,536	0,0031
Нейтрофилы	2,104	1,844–2,351	0,0045
Лимфоциты	2,573	2,238–2,795	0,0062
Гемоглобин	–0,782	0,465–0,827	0,0434
Эритроциты	–1,647	1,396–1,853	0,0028
Тромбоциты	1,548	1,327–1,795	0,0019
Креатинин	0,725	0,453–0,869	0,0679
Мочевая кислота	0,609	0,365–0,822	0,0628
Глюкоза	–2,312	2,109–2,675	0,0022
Калий	–2,884	2,647–3,091	0,0035
Соотношение глюкозы к калию	2,652	2,455–2,893	0,0019
Константа	7,561	–	–

Разработанная с учётом наиболее информативных переменных скорректированная многофакторная регрессионная модель для прогнозирования неблагоприятных исходов ЧМТ имеет следующий вид:

$$y = 7,561 + 2,652x_1 - 2,848x_2 + 2,458x_3 + 2,573x_4,$$

где y – неблагоприятный прогноз ЧМТ; x_1 – соотношение глюкозы к калию в крови; x_2 – содержание калия в крови; x_3 – содержание лейкоцитов в крови; x_4 – содержание лимфоцитов в крови.

Прогностическая ценность созданной модели показала, что AUC составляет 0,725 ($p = 0,0012$) с чувствительностью 62,875%, специфичностью 71,896%. Это указывает на приемлемое качество созданной прогностической модели и возможность её использования в клинической практике.

Клинические исследования и эксперименты показали, что показатели воспаления после ЧМТ, такие как соотношение нейтрофилов к лимфоцитам (NLR) и соотношение тромбоцитов к лимфоцитам (PLR), играют важную роль в прогнозировании клинических исходов нейротравматических заболеваний [8]. Например, исследование, основанное на 688 случаях тяжёлой черепно-мозговой травмы, показало, что у 508 пациентов (73,8%) через год после травмы прогноз был неблагоприятным [9]. Значение NLR в группе с неблагоприятным прогнозом при поступлении было значительно выше, чем в группе с благоприятным прогнозом [10]. Многофакторный логистический анализ показал, что более высокий показатель NLR коррелирует с неблагоприятным исходом [11]. Значение NLR у пациентов при поступлении повышало вероятность неблагоприят-

ного прогноза, функционального исхода и смертности у пациентов с тяжёлой черепно-мозговой травмой в течение 1 года [12]. NLR может служить легкодоступным клиническим маркером для прогнозирования исхода у пациентов с тяжёлой ЧМТ, а высокий показатель NLR при поступлении связан с неблагоприятным прогнозом у пациентов с неврологическими нарушениями [13]. Как ни парадоксально, одноцентровое исследование с участием 255 пациентов показало, что стандартные анализы крови, в т. ч. NLR, проведённые при поступлении, не являются значимыми предикторами исхода лёгкой черепно-мозговой травмы [14].

Нами также подтверждён данный факт о повышенном содержании нейтрофилов в крови после ЧМТ, но их увеличение было меньше, чем сообщалось в работе [15]. Однако нейтрофилы, по данным другого исследования [16], не вошли в число прогностических факторов, влияющих на исход ЧМТ.

Установлено также, что после ЧМТ из-за повреждения паренхимы головного мозга в системный кровоток высвобождается в большом количестве тканевой тромбопластин, активирующий внешний каскад свёртывания, повреждённый эндотелий напрямую активирует тромбоциты и внутренний каскад свёртывания, а активация плазмина приводит к фибринолизу. Повышение RDW после черепно-мозговой травмы, вероятно, связано с увеличением количества цитокинов, таких как фактор некроза

опухоли альфа (TNF- α), интерлейкин 1 β (IL-1 β) и IL-6, которые препятствуют созреванию эритроцитов, вызванному эритропоэтином, и ускоряют высвобождение более крупных ретикулоцитов [17], хотя с помощью позитронно-эмиссионной томографии и церебрального микродиализа было доказано, что метаболизм лактата в головном мозге изменяется после ЧМТ [18]. Гиперлактатемия в сыворотке крови после ЧМТ отражает степень гипоперфузии и гипоксии тканей, а также функцию печени и почек, тем самым являясь косвенным показателем тяжести травмы [19]. Однако в отношении прогностической значимости тромбоцитов крови имеются противоречивые данные. Так, нами выявлен повышенный уровень тромбоцитов у пациентов с ЧМТ относительно пациентов без ЧМТ с достоверным различием в 1,35 раза.

В то же время в исследовании K. M. Rei, J. Siddiqi [20] показано, что содержание тромбоцитов при неблагоприятном исходе ЧМТ ниже. Кроме того, эти авторы сообщают об отсутствии значимого влияния содержания тромбоцитов в крови на исход ЧМТ, поскольку в многомерном регрессионном анализе влияние тромбоцитов оказалось незначимым и авторы объясняют это различными причинами. Во-первых, поскольку это одноцентровое ретроспективное исследование, оно может быть необъективным. Во-вторых, это исследование, скорее всего, не обладало достаточной мощностью для внутренней

проверки усовершенствованных моделей и количественной оценки степени улучшения дискриминации. Однако из-за недостатка литературы по корректировке биомаркеров для проверенных моделей предварительный расчёт мощности был невозможен. В-третьих, точное время, прошедшее с момента получения травмы до измерения биомаркеров, неизвестно, что вносит определённую неоднородность. Однако все показатели биомаркеров были получены в течение 24 часов после травмы. В-четвёртых, как и в случае с прогностической моделью, в этот анализ были включены пациенты с множественными эпидуральными кровоизлияниями. Однако анализ чувствительности показал, что только один биомаркер стал незначимым после поправки на множественные эпидуральные кровоизлияния ($p = 0,051$). В-пятых, как и в случае с прогностической моделью, у 19% пациентов время наблюдения было сокращено. Однако пациенты с множественными эпидуральными кровоизлияниями и сокращённым временем наблюдения были исключены. Для подтверждения эффективности прогностической модели с использованием вышеуказанных биомаркеров необходимы масштабные проспективные исследования.

Вместе с тем, как нами, так и другими специалистами [16], установлено достоверное влияние содержания калия в крови на исход ЧМТ. Согласно публикации [16], относительный риск снижения содержания калия в крови в

неблагоприятном исходе ЧМТ в многомерном анализе составляет 1,884 (95% – доверительный интервал: 1,222–2,904; $p = 0,004$), а в одномерном анализе – 2,428 (95% – доверительный интервал: 1,800–3,275; $p = 0,001$). Кроме того, многофакторный логистический регрессионный анализ показал, что возраст, систолическое артериальное давление (САД), размер зрачка, субарахноидальное кровоизлияние (САК), SII, PLR, концентрация калия в сыворотке крови $[K^+]$, концентрация кальция в сыворотке крови $[Ca^{2+}]$, международное нормализованное отношение (МНО), С-реактивный белок (CRP) и индекс сопутствующего системного иммунного воспаления в сочетании с диоксидом углерода ($coSII-CO_2$) ($P < 0,001$) были независимыми прогностическими факторами для ГСН у пациентов с тяжелой ЧМТ.

Выводы

Для диагностики и прогнозирования неблагоприятных исходов ЧМТ предлагается использовать созданную многофакторным регрессионным анализом скорректированную по полу и возрасту модель:

$$y = 7,561 + 2,652x_1 - 2,848x_2 + 2,458x_3 + 2,573x_4,$$

обеспечивающую точность прогнозирования до 0,725 с чувствительностью 62,875% и специфичностью 71,896%. Достоверными предикторами неблагоприятных исходов ЧМТ среди показателей крови являются повышение содержания лейкоцитов до 8,86, 10⁹/л и более,

нейтрофилов до $4,15, 10^9/\text{л}$ и более, лимфоцитов до $2,61, 10^9/\text{л}$ и более, тромбоцитов до $295,17, 10^9/\text{л}$ и более, соотношение глюкозы к калию до $2,11$ и более, снижение содержания в крови эритроцитов до $3,94, 10^{12}/\text{л}$ и менее, глюкозы до

$4,08 \text{ г/л}$ и менее, калия до $1,93 \text{ мкмоль/л}$ и менее.

Перспективами дальнейших исследований являются применение алгоритмов машинного обучения для совершенствования прогнозирования исходов ЧМТ.

Список литературы

1. Capizzi A., Woo J., Verduzco-Gutierrez M. Traumatic brain injury // Med. Clin. North. Am. 2020. N 104. P. 213–238. <https://doi.org/10.1016/j.mcna.2019.11.001>
2. Neuroinflammation and blood-brain barrier disruption following traumatic brain injury: Pathophysiology and potential therapeutic targets / S. Sulhan, K. A. Lyon, L. A. Shapiro, J. H. Huang // J. Neurosci. Res. 2020. N 98. P. 19–28. <https://doi.org/10.1002/jnr.24331>
3. Kempuraj D., Selvakumar G. P., Ahmed M. E., et al. COVID-19, Mast Cells, Cytokine Storm, Psychological Stress, and Neuroinflammation // Neuroscientist. 2020. N 26. P. 402–414. <https://doi.org/10.1177/1073858420941476>
4. Systematic Review of Serum Biomarkers in Traumatic Brain Injury / K. Mozaffari, D. Dejam, C. Duong [et al.] // Cureus. 2021. N 13. P. e17056. <https://doi.org/10.7759/cureus.17056>
5. An update on diagnostic and prognostic biomarkers for traumatic brain injury / K. K. Wang, Z. Yang, T. Zhu [et al.] // Expert Rev Mol Diagn. 2018. N 18. P. 165–180. <https://doi.org/10.1080/14737159.2018.1428089>
6. Inflammation biomarkers IL 6 and IL 10 may improve the diagnostic and prognostic accuracy of currently authorized traumatic brain injury tools / C. Tsitsipanis, M. Miliaraki, E. Paflioti [et al.] // Exp Ther Med. 2023. N 26. P. 364. <https://doi.org/10.3892/etm.2023.12063>
7. Клинические рекомендации «Очаговая травма головного мозга» / А. А. Потапов, Б. В. Крылов, С. С. Петриков [et al.]. М.: Ассоциация нейрохирургов России, 2024. 82 с.
8. Circulating neutrophil-to-lymphocyte ratio at admission predicts the long-term outcome in acute traumatic cervical spinal cord injury patients / J. L. Zhao, S. T. Lai, Z. Y. Du [et al.] // BMC Musculoskelet Disord. 2020. N 21. P. 548. <https://doi.org/10.1186/s12891-020-03556-z>
9. Neutrophil-to-Lymphocyte ratio is an independent predictor of 30-day mortality of intracerebral hemorrhage patients: A validation cohort study / F. Wang, L. Wang, T. T. Jiang [et al.] // Neurotox Res. 2018. Vol. 34, N 3. P. 347–352. <https://doi.org/10.1007/s12640-018-9890-6>
10. Peak neutrophil-to-Lymphocyte ratio correlates with clinical outcomes in patients with severe traumatic brain injury / J. Chen, X. Qu, Z. Li [et al.] // Neurocrit Care. 2019. Vol. 30, N 2. P. 334–339. <https://doi.org/10.1007/s12028-018-0622-9>

11. Neutrophil-to-Lymphocyte ratio predicts the outcome of acute intracerebral hemorrhage / S. Lattanzi, C. Cagnetti, L. Provinciali [et al.] // *Stroke*. 2016. Vol. 47, N 6. P. 1654–1657. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.116.013627>
12. The Neutrophil/Lymphocyte Count Ratio Predicts Mortality in Severe Traumatic Brain Injury Patients / D. Siwicka-Gieroba, K. Malodobry, J. Biernawska [et al.] // *J. Clin. Med.* 2019. N 8. P. 1453. <https://doi.org/10.3390/jcm8091453>
13. Neutrophil to Lymphocyte Ratio as a Novel Predictor of Outcome in Patients With Severe Traumatic Brain Injury / W. Chen, J. Yang, B. Li [et al.] // *J. Head Trauma Rehabil.* 2018. N 33. P. E53–E59. <https://doi.org/10.1097/HTR.0000000000000320>
14. Routine Blood Tests for Severe Traumatic Brain Injury: Can They Predict Outcomes? / R. G. F. Dolmans, A. F. C. Hulsbergen, W. B. Gormley, M. L. D. Broekman // *World Neurosurg.* 2020. N 136. P. e60–e67. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2019.10.086>
15. Alam A., Thelin E.P., Tajsic T., et al. Cellular infiltration in traumatic brain injury // *J. Neuroinflammation*. 2020. N 17. P. 328. <https://doi.org/10.1186/s12974-020-02005-x>
16. Systemic immune inflammation index and peripheral blood carbon dioxide concentration at admission predict poor prognosis in patients with severe traumatic brain injury / L. Chen, S. Xia, Y. Zuo [et al.] // *Front Immunol.* 2023. N 12. P. 1034916. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.1034916>
17. A Prognostic Model Incorporating Red Cell Distribution Width to Platelet Ratio for Patients with Traumatic Brain Injury / R. Wang, M. He, J. Zhang [et al.] // *Ther Clin Risk Manag.* 2021. N 17. P. 1239–1248. <https://doi.org/10.2147/TCRM.S337040>
18. Cerebral Lactate Metabolism After Traumatic Brain Injury / C. Patet, T. Suys, L. Carteron [et al.] // *Curr Neurol Neurosci Rep.* 2016. Vol. 16, N 4. P. 31. <https://doi.org/10.1007/s11910-016-0638-5>
19. Lactate/Albumin Ratio Is Associated With Mortality in Patients With Moderate to Severe Traumatic Brain Injury / R. Wang, M. He, F. Qu [et al.] // *Front Neurol.* 2022. N 13. P. 662385. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.662385>
20. Rei K. M., Siddiqi J. Novel Hematologic Inflammatory Biomarker Ratios Derived From Routinely Ordered Labs Upon Admission: Enhancement of the International Mission for Prognosis and Analysis of Clinical Trials Prognostic Model for Moderate-to-Severe Traumatic Brain Injury // *Cureus*. 2025. N 17. P. e92601. <https://doi.org/10.7759/cureus.92601>

References

1. Capizzi A., Woo J., Verduzco-Gutierrez M. Traumatic brain injury. *Med. Clin. North. Am.* 2020;(104):213–238. <https://doi.org/10.1016/j.mcna.2019.11.001>
2. Sulhan S., Lyon K.A., Shapiro L.A., Huang J.H. Neuroinflammation and blood-brain barrier disruption following traumatic brain injury: Pathophysiology and potential therapeutic targets. *J. Neurosci. Res.* 2020;98:19–28. <https://doi.org/10.1002/jnr.24331>
3. Kempuraj D., Selvakumar G.P., Ahmed M.E., et al. COVID-19, Mast Cells, Cytokine Storm, Psychological Stress, and Neuroinflammation. *Neuroscientist.* 2020;(26):402–414. <https://doi.org/10.1177/1073858420941476>

4. Mozaffari K., Dejam D., Duong C., et al. Systematic Review of Serum Biomarkers in Traumatic Brain Injury. *Cureus*. 2021;(13):e17056. <https://doi.org/10.7759/cureus.17056>
5. Wang K.K., Yang Z., Zhu T., et al. An update on diagnostic and prognostic biomarkers for traumatic brain injury. *Expert Rev Mol Diagn*. 2018;(18):165–180. <https://doi.org/10.1080/14737159.2018.1428089>
6. Tsitsipanis C., Miliaraki M., Paflioti E., et al. Inflammation biomarkers IL 6 and IL 10 may improve the diagnostic and prognostic accuracy of currently authorized traumatic brain injury tools. *Exp Ther Med*. 2023;(26):364. <https://doi.org/10.3892/etm.2023.12063>
7. Potapov A.A., Krylov V.V., Petrikov S.S., et al. Clinical recommendations "Focal brain injury". Moscow: Assotsiatsiya neirokhirurgov Rossii; 2024. 82 p. (In Russ.)
8. Zhao J.L., Lai S.T., Du Z.Y., et al. Circulating neutrophil-to-lymphocyte ratio at admission predicts the long-term outcome in acute traumatic cervical spinal cord injury patients. *BMC Musculoskelet Disord*. 2020;(21):548. <https://doi.org/10.1186/s12891-020-03556-z>
9. Wang F., Wang L., Jiang T.T., et al. Neutrophil-to-Lymphocyte ratio is an independent predictor of 30-day mortality of intracerebral hemorrhage patients: A validation cohort study. *Neurotox Res*. 2018;34(3):347–352. <https://doi.org/10.1007/s12640-018-9890-6>
10. Chen J., Qu X., Li Z., et al. Peak neutrophil-to-Lymphocyte ratio correlates with clinical outcomes in patients with severe traumatic brain injury. *Neurocrit Care*. 2019;30(2):334–339. <https://doi.org/10.1007/s12028-018-0622-9>
11. Lattanzi S., Cagnetti C., Provinciali L., et al. Neutrophil-to-Lymphocyte ratio predicts the outcome of acute intracerebral hemorrhage. *Stroke*. 2016;47(6):1654–1657. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.116.013627>
12. Siwicka-Gieroba D., Malodobry K., Biernawska J., et al. The Neutrophil/Lymphocyte Count Ratio Predicts Mortality in Severe Traumatic Brain Injury Patients. *J. Clin. Med*. 2019;(8):1453. <https://doi.org/10.3390/jcm8091453>
13. Chen W., Yang J., Li B., et al. Neutrophil to Lymphocyte Ratio as a Novel Predictor of Outcome in Patients With Severe Traumatic Brain Injury. *J. Head Trauma Rehabil*. 2018;(33):E53–E59. <https://doi.org/10.1097/HTR.0000000000000320>
14. Dolmans R.G.F., Hulsbergen A.F.C., Gormley W.B., Broekman M.L.D. Routine Blood Tests for Severe Traumatic Brain Injury: Can They Predict Outcomes? *World Neurosurg*. 2020;136:e60–e67. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2019.10.086>
15. Alam A., Thelin E.P., Tajsic T., et al. Cellular infiltration in traumatic brain injury. *J. Neuroinflammation*. 2020;(17):328. <https://doi.org/10.1186/s12974-020-02005-x>
16. Chen L., Xia S., Zuo Y., et al. Systemic immune inflammation index and peripheral blood carbon dioxide concentration at admission predict poor prognosis in patients with severe traumatic brain injury. *Front Immunol*. 2023;(12):1034916. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.1034916>
17. Wang R., He M., Zhang J., et al. A Prognostic Model Incorporating Red Cell Distribution Width to Platelet Ratio for Patients with Traumatic Brain Injury. *Ther Clin Risk Manag*. 2021;(17):1239–1248. <https://doi.org/10.2147/TCRM.S337040>
18. Patet C., Suys T., Carteron L., et al. Cerebral Lactate Metabolism After Traumatic Brain Injury. *Curr Neurol Neurosci Rep*. 2016;16(4):31. <https://doi.org/10.1007/s11910-016-0638-5>

19. Wang R., He M., Qu F., et al. Lactate Albumin Ratio is Associated With Mortality in Patients With Moderate to Severe Traumatic Brain Injury. *Front Neurol.* 2022;(13):662385. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.662385>

20. Rei K.M., Siddiqi J. Novel Hematologic Inflammatory Biomarker Ratios Derived From Routinely Ordered Labs Upon Admission: Enhancement of the International Mission for Prognosis and Analysis of Clinical Trials Prognostic Model for Moderate-to-Severe Traumatic Brain Injury. *Cureus.* 2025;(17):e92601. <https://doi.org/10.7759/cureus.92601>

Информация об авторах / Information about the Authors

Лысенко Анастасия Сергеевна,
врач-невролог, Курская городская больница
№ 1 имени Н. С. Короткова,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: anastasiya-lysenko-96@mail.ru,
ORCID: 0009-0001-6521-2130

Anastasia S. Lysenko, Neurologist, Kursk City Hospital No. 1 named after N. S. Korotkov, Kursk, Russian Federation,
e-mail: anastasiya-lysenko-96@mail.ru,
ORCID: 0009-0001-6521-2130

Агарков Николай Михайлович, профессор кафедры пропедевтики внутренних болезней и клинических информационных технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород; доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vitalaxen@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-4821-3692

Nikolay M. Agarkov, Professor at the Department of Propaedeutics of Internal Diseases and Clinical Information Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod; Doctor of Sciences (Medical), Professor, Professor at the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vitalaxen@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-4821-3692

Якунченко Татьяна Игоревна, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой пропедевтики внутренних болезней и клинических информационных технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород; ведущий научный сотрудник кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: yakunchenko@bsuedu.ru,
ORCID: 0000-0002-4031-6267

Tatyana I. Yakunchenko, Doctor of Sciences (Medical), Professor, Head of the Department of Propaedeutics of Internal Diseases and Clinical Information Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod; Leading Researcher at the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: yakunchenko@bsuedu.ru,
ORCID: 0000-0002-4031-6267

Гонтарев Сергей Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой детской стоматологии, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород; ведущий научный сотрудник кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: znamisng@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5607-5747

Шмарова Диана Руслановна, студент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: shmarova.diana@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3436-4059

Шорохова Анастасия Алексеевна, студент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: shorohova20015@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3436-4059

Sergey N. Gontarev, Doctor of Sciences (Medical), Professor, Head of the Department of Pediatric Dentistry, Belgorod State National Research University, Belgorod; Leading Researcher at the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: znamisng@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5607-5747

Diana R. Shmarova, Student at the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: shmarova.diana@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3436-4059

Anastasia A. Shorokhova, Student at the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: shorohova20015@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3436-4059

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2. Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

– статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;

– разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа.

– сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);

– лицензионный договор.

3. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами.

4. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

5. Публикация бесплатная.

6. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны – 2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

7. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (строчные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, список литературы. Авторы, название, аннотация и ключевые слова, список литературы приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается аннотация (200–250 слов), отражающая краткое содержание статьи.

8. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы (Ω, η, β, μ, ω, υ и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций (sin, cos, tg и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 dpi и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы.**

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются**.

12. **Список литературы к статье обязательен** и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы (не менее 10). Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26, тел/факс (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала: <https://swsu.ru/izvestiya/seriesivt/>.