

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Известия
Юго-Западного
государственного университета**

**Серия: Управление, вычислительная
техника, информатика. Медицинское
приборостроение**

Научный журнал

Том 15 № 3 / 2025

**Proceedings
of the Southwest
State University**

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

Scientific Journal

Vol. 15 № 3 / 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)

Титов Виталий Семенович, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск, 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

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

 **creative commons** Материалы журнала доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

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 30.09.2025. Формат 60×84/8.

Дата выхода в свет 21.11.2025.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 28,5.

Тираж 1000 экз. Заказ 46.



**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)

Vitaly S. Titov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, 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. Zhusubaliyev, 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 30.09.2025. Format 60×84/8.

Release date 21.11.2025.

Offset paper. Printer's sheets: 28,5.

Circulation 1000 copies. Order 46.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ	8
Клиентский медицинский веб-сервис.....	8
Коваленко М. С., Григорьян А. Л., Сахно Д. А., Григорьян О. Л.	
Программно-информационная система оценивания когнитивных способностей сотрудников и кандидатов в HR-отделах	21
Томакова Р. А., Малышев А. В., Быков А. В.	
Роль распределённых вычислительных систем в современных технологических экосистемах.....	40
Нестерович С. А., Брежнева А. Н.	
Интеллектуальная система поддержки принятия решений врача в диагностике новообразований кожи на основе анализа дерматоскопических изображений	50
Козачок Е. С., Серегин С. С., Козачок А. В., Елецкий К. В., Самоваров О. И.	
МЕХАТРОНИКА, РОБОТОТЕХНИКА.....	66
Comparison of machine learning algorithms for dynamic robot path planning.....	66
Kaimakova A. B., Aldamuratov Z. U.	
Особенности представления сигналов в малобазовой поляризационной измерительной системе	79
Мухин И. Е., Попов А. Н., Хмелевская А. В., Олейник И. И.	
РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ.....	93
Набор дерматоскопических изображений для ранней диагностики злокачественных новообразований кожи	93
Козачок Е. С.	
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ.....	112
Использование модели видеонаблюдения для системы «умной среды» в организации работы регионального оператора по обращению с твердыми коммунальными отходами.....	112
Александров Д. В., Гуламов А. А.	
Оценка точности методов контроля частоты ложных срабатываний при аннотации спектра de novo.....	122
Тевяшов М. М.	
Анализ возможностей двухпроводного способа подключения резистивного датчика температуры	142
Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Демченко С. С.	
Метод и алгоритм управления процессами принятия решений по оценке риска возникновения локальной вибрационной болезни кистей рук и сопутствующих невротических расстройств.....	160
Кныш О. А., Разумова К. В., Родионова С. Н., Филист С. А., Мишустин В. Н.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	181
Система поддержки принятия решений при прогнозировании и диагностике эндометрита в послеродовом периоде	181
Аксёнов В. В., Серегин С. П., Громыко С. А., Петров С. В., Хардиков А. В., Петрова А. С.	
TB-SEIRZ-Q: моделирование эпидемиологии туберкулеза в России с множественной лекарственной устойчивостью и карантином	201
Корчевская О. В.	
Novel numerical methods for solving the SEIRD model	216
Taha A. Tariq, Konstantinov I. S., Mamatov A. V.	
Прогнозирование ишемической болезни сердца на основе гибридных нечетких правил принятия решений	232
Родионова С. Н., Филист С. А., Разумова К. В., Азалиева О. М.	
К сведению авторов.....	245

CONTENT

INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS	8
Client medical web-service	8
<i>Kovalenko M. S., Grigorian A. L., Sakhno D. A., Grigorian O. L.</i>	
Development of a software and information system for testing the emotional sphere of a person	21
<i>Tomakova R. A., Malyshев A. V., Bykov A. V.</i>	
The role of distributed computing systems in modern technological ecosystems	40
<i>Nesterovich S. A., Brezhneva A. N.</i>	
Intelligent system for supporting physician decision-making in skin neoplasm diagnostics based on dermatoscopic image analysis	50
<i>Kozachok E. S., Seregin S. S., Kozachok A. V., Eleckij K. V., Samovarov O. I.</i>	
MECHATRONICS, ROBOTICS	66
Сравнение алгоритмов машинного обучения для динамического планирования пути робота	66
<i>Каймакова А. Б., Алдамуратов Ж. У.</i>	
Features of signal representation in a low-phase polarization measuring system.....	79
<i>Mukhin I. E., Popov A. N., Khmelevskaya A. V., Oleynik I. I.</i>	
IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING	93
Dermatoscopic image dataset for early diagnosis of malignant skin neoplasms.....	93
<i>Kozachok E. S.</i>	
SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING	112
Using a video surveillance model for the system "smart environment" in the organization of the work of the regional operator for the management of municipal solid waste	112
<i>Aleksandrov D. V., Gulamov A. A.</i>	
Evaluation of the accuracy of false alarm frequency control methods for de novo spectrum	122
<i>Tevyashov M. M.</i>	
Analysis of the possibilities of a two-wire connection method for a resistive temperature sensor	142
<i>Bondar O. G., Brezhneva E. O., Demchenko S. S.</i>	
A method and algorithm for managing decision-making processes for assessing the risk of local vibration disease of the hand and associated neurotic disorders	160
<i>Knysh O. A., Razumova K. V., Rodionova S. N., Filist S. A., Mishustin V. N.</i>	
MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS	181
Decision support system for prediction and diagnosis of endometritis in the postpartum period.....	181
<i>Aksenov V. V., Seregin S. P., Gromiko S. A., Petrov S. V., Khardikov A. V., Petrova A. S.</i>	
TB-SEIRZ-Q: Modeling the epidemiology tuberculosis in Russia with multidrug resistance and quarantine	201
<i>Korchevskaya O. V.</i>	
Новые численные методы для решения модели SEIRD.....	216
<i>Taxa A. Тарик, Константинов И. С., Маматов А. В.</i>	
Prediction of ischemic heart disease based on hybrid fuzzy decision rules	232
<i>Rodionova S. N., Filist S. A., Razumova K. V., Azalieva O. M.</i>	
К сведению авторов	245

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-8-20>



УДК 004

Клиентский медицинский веб-сервис

М. С. Коваленко¹, А. Л. Григорьян²✉, Д. А. Сахно³, О. Л. Григорьян⁴

¹ Кубанский государственный университет
ул. Ставропольская, д. 149, г. Краснодар 350040, Российская Федерация

² Белорусский государственный медицинский университет
ул. Дзержинского, д. 83, г. Минск 220083, Республика Беларусь

³ Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова (Сеченовский университет)
ул. Трубецкая, д. 8/2, г. Москва 119048, Российская Федерация

⁴ Воронежский государственный медицинский университет им. Н. Н. Бурденко
ул. Студенческая, д. 10, г. Воронеж 394036, Российская Федерация

✉ e-mail: ms.bucky@mail.ru

Резюме

Цель исследования заключается в определении требований и разработке концепции и архитектуры мультисервисной системы «Клиентский медицинский веб-сервис».

Методы. В основе требований к системе «Клиентский медицинский веб-сервис» положен проведенный исполнителями работы опрос 500 респондентов об их предпочтениях в области использования персональной информации о здоровье. Анализ ответов проводился с использованием методов математической статистики.

Результаты. По результатам опроса выявлены основные требования к разработке мультисервисных систем: наличие личного участия пациента, удобство использования системы и скорость передачи информации. На основании требований разработана двухкомпонентная система «Клиентский медицинский веб-сервис» на основании предложенной нами карт-схемы. Архитектура системы включила в себя систему взаимосвязанных модулей, информация которых передается по HTTPS-протоколу с оптимальным кэшированием и хранением медицинской информации. Предлагаемая система обеспечит возможность осуществления безопасного обмена информацией между учреждением здравоохранения и пациентом, предоставив сторонам управление уровнями доступа. Интегрированный подход к хранению информации реализуется работой API-сервера, обеспечивая высокий уровень безопасности данных облачного хранилища и его реализацию в рамках удаленного доступа.

Заключение. Предложенная система «Клиентский медицинский веб-сервис» предлагает перспективы в повышении качества услуг по предоставлению медицинской информации, ее обмену и хранению. Участие пациента в заполнении своей медицинской информации, управление ее уровнями доступа и распространение в случае необходимости позволят достичь высокого результата, поскольку информация станет открыта для пациента и тем самым повысит его долю в самоконтроле лечения и выполнения назначений. Практическая реализация предлагаемой системы обеспечит улучшение динамики ведения болезней, сохранив при этом безопасность данных и не нарушив принципов конфиденциальности.

© Коваленко М. С., Григорьян А. Л., Сахно Д. А., Григорьян О. Л.

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление,
вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025;15(3):8–20

Ключевые слова: медицинская информационная система; база данных; пациент.

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

Для цитирования: Клиентский медицинский веб-сервис / М. С. Коваленко, А. Л. Григорьян, Д. А. Сахно, О. Л. Григорьян // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 3. С. 8–20. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-8-20>

Поступила в редакцию 11.07.2025

Подписана в печать 10.08.2025

Опубликована 30.09.2025

Client medical web-service

Maksim S. Kovalenko¹, Anastasiia L. Grigorian²✉,
Daria A. Sakhno³, Olga L. Grigorian⁴

¹ Kuban State University
149 Stavropolskaya Str., Krasnodar 350040, Russian Federation

² Belarusian State Medical University
83 Dzerzhinsky Str., Minsk 220083, Republic of Belarus

³ I. M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenovskiy University)
8/2 Trubetskaya Str., Moscow 119992, Russian Federation

⁴ N. N. Burdenko Voronezh State Medical University
10 Studencheskaya Str., Voronezh 394036, Russian Federation

✉ e-mail: ms.bucky@mail.ru

Abstract

The purpose of research is to define the requirements and develop the concept and architecture of the multiservice system "Client medical web service".

Methods. The requirements to the system "Client medical web-service" are based on the survey of 500 respondents about their preferences in the field of using personal health information. The answers were analyzed using the methods of mathematical statistics.

Results. The results of the survey revealed the main requirements for the development of multiservice systems – the presence of personal involvement of the patient, the usability of the system and the speed of information transfer. Based on the requirements the two-component system "Client medical web-service" was developed on the basis of the map-scheme proposed by us. The system architecture included a system of interconnected modules whose information is transmitted via HTTPS-protocol with optimal caching and storage of medical information. The proposed system will enable secure information sharing between the healthcare facility and the patient by providing the parties with access level management. The integrated approach to information storage is realized by the API server operation, providing a high level of cloud storage data security and its implementation within remote access.

Conclusion. The proposed system "Client medical web-service" offers prospects in improving the quality of services for providing medical information, its exchange and storage. Patient participation in completing their health information, managing its access levels and disseminating it when necessary will achieve a high result, as the information will be open to the patient and thus increase their share in self-monitoring of treatment and prescription fulfillment. Practical implementation of the proposed system will provide improved disease management dynamics while maintaining data security and not violating confidentiality principles.

Keywords: medical information system; database; patient.

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

For citation: Kovalenko M.S., Grigorian A.L., Sakhno D.A., Grigorian O.L. Client Medical WEB-service. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoе priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(3):8–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-8-20>

Received 11.07.2025

Accepted 10.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

Повышение качества медицинского обслуживания и социальной защиты населения на основе внедрения информационных и телекоммуникационных технологий является приоритетной задачей развития информационных технологий страны¹. Значительно расширить возможности медицинского обслуживания предполагается за счет внедрения новых методов оказания медицинской помощи, а также дистанционного обслуживания пациентов.

В основе дистанционного обслуживания лежит концепция мониторинга и анализа показателей качества медицинской помощи. В соответствии с этой концепцией может быть создана государственная информационная система персонифицированного учета оказания медицинской помощи. При этом предполагается, что источниками первичной информации для формирования элементов

системы должны стать медицинские учреждения, а также территориальные фонды обязательного медицинского страхования.

Наиболее важными элементами системы являются «электронная история болезни» и «электронная персональная медицинская запись», определение, правила создания и использования которых содержатся в ГОСТ Р 52636-2006, вступившем в силу с 01.01.2008 г.² Оба элемента являются основой для сбора и хранения анамнеза пациента и обуславливают качество проведения первичного диагностического облучивания. Следует отметить, что важно не только создать специализированную систему обработки и хранения медицинских данных, но и обеспечить возможность одновременной работы с ней как медицинского персонала, так и самого пациента [1]. Таким образом, необходимо обеспечить доступ пользователей (пациентов)

¹ Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации: Федеральный закон от 21 ноября 2011 г. № 323-ФЗ: [ред. от 29.07.2017 г.]. URL: <https://minzdrav.gov.ru/documents/7025-federalnyy-zakon-323-fz-ot-21-noyabrya-2011-g> (дата обращения: 17.06.2025).

² ГОСТ Р 52636-2006. Электронная история болезни. Общие положения. Национальный стандарт Российской Федерации. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200048924> (дата обращения: 17.06.2025).

к программному продукту, структура и технические параметры которого адаптированы для информационного сопровождения медицинской информации клиента.

Общая концепция системы медицинского менеджмента предполагает наличие информационной системы, состоящей из сервисов медицинской направленности, технические характеристики и структура которых адаптированы для информационного сопровождения медицинского обслуживания пользователя. Данная система должна быть направлена на решение задач по повышению эффективности накопления и централизованного хранения медицинской истории пациента, включающей посещение врачей, результаты обследований и анализов, журналы назначения и приёма медикаментов, а также контроль выполнения пациентом медицинских рекомендаций и назначений.

Исследование и разработка требований к мультисервисной системе должны включать компоненты взаимодействия пациент-медработник и учитывать особенности работы с персональной медицинской информацией.

Материалы и методы

В основе требований к системе «Клиентский медицинский веб-сервис» лежат результаты проведенного исполнителями работы опроса 500 респондентов. Были выявлены особенности в обработке, хранении и использовании

медицинской информации, на которые чаще всего обращает внимание опрошенное население. Результаты опроса обработаны с помощью методов математической статистики.

Результаты и их обсуждение

Сервисы управления медицинской информации должны учитывать потребности как населения, так и медицинских учреждений. Отмечается, что существует необходимость полноценного и многофакторного подхода к ведению пациентов [2], их курированию с точки зрения этических и деонтологических принципов [3], а также управления и защиты медицинской информации [4]. Использование мультисервисных систем может стать решением данных вопросов в контексте как государственного администрирования и мер по улучшению качества предоставляемой медицинской помощи (включая информационную), так и повышения осведомленности населения [5].

Мультисервисная система «Клиентский медицинский веб-сервис» будет относиться к классу медицинских информационных систем в области цифрового здравоохранения с применением инновационных информационно-телекоммуникационных технологий. По определению ГОСТ Р 52636-2006¹ медицинская информационная система (МИС) – это комплексная автоматизированная информационная система², в которой объединены электронные медицинские записи о пациентах, данные медицинских исследований в цифровой форме,

¹ ГОСТ Р 52636-2006. Электронная история болезни. Общие положения. Национальный стандарт Российской Федерации. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200048924> (дата обращения: 17.06.2025).

² О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы: Указ Президента Российской Федерации от 9 мая 2017 г. № 203. URL: <https://base.garant.ru/71670570/> (дата обращения: 17.06.2025).

данные мониторинга состояния пациента с медицинских приборов, средства общения между сотрудниками, финансовая и административная информация¹.

Анализ рынка ИТ решений цифрового здравоохранения в настоящее время показывает, что предлагаемые медицинские информационные системы обычно построены в виде разрозненных автоматизированных рабочих мест и включают разные технические средства и математические платформы. Эти медицинские информационные системы чаще всего не интегрированы в рамках между различными медицинскими учреждениями и ориентированы на финансовые и хозяйствственные нужды [6]. Авторы отмечают, что не происходит комплексного обеспечения информацией как врача, так и пациента. Кроме того, следует отметить проблему восприятия МИС и ее интеграции в медицинское пространство [7]. Процесс информатизации здравоохранения затруднен и требует, вероятно, более глубоких мер, направленных на развитие МИС [8]. Требуются меры по привлечению дополнительных инвестиций в разработку и внедрению подобных систем, а также созданию образовательных программ как для сотрудников учреждений, так и для пациентов. Внедрение «Клиентского медицинского веб-сервиса» может стать решением данных проблем и восполнить пробел в несовершенстве медицинской информации.

В результате проведенного опроса установлено, что личное участие

пациента в наполнении своей электронной истории болезни является преимуществом информационных систем. Часть опрошенных уверены, что личное участие позволит улучшить самостоятельное ведение болезни и своевременное обращение в медицинское учреждение в случае ухудшения состояния. Участие пациента в заполнении электронной истории болезни в действительности может способствовать эффективному накоплению важных для лечения данных, а также использоваться в качестве инструмента по улучшению контроля выполнения пациентов медицинских рекомендаций и назначений. Доступными для заполнения самостоятельно может стать следующая информация: посещение врачей, результаты обследований, анализов, дневник приема медикаментов и т. д.

С учетом необходимости централизованного управления информацией и возможностью обмена ей между различными медицинскими учреждениями (в том числе на региональном и федеральном уровнях) использование систем мониторинга показателей здоровья облегчает контроль за состоянием здоровья, поддерживает лояльность пациента к лечению [9], обеспечивает получение более достоверной и проверенной информации о состоянии здоровья, включая обратную связь по оценке действия лекарственных препаратов и их нежелательных последствий [1]. Сотрудничество врача и пациента в рамках электронных медицинских сервисов

¹ ГОСТ Р 52636-2006. Электронная история болезни. Общие положения. Национальный стандарт Российской Федерации. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200048924>

(дата обращения: 17.06.2025).

позволит оценивать динамику развития заболевания в формате онлайн, обсуждать и вносить корректизы в тактику лечения в случае необходимости [8]. Поскольку система предполагает возможность самостоятельного внесения пользователем медицинских записей (результатов анализов, осмотров, обследований), есть шанс повысить его вовлеченность в мониторинг своего здоровья в пределах своих компетенций и возможностей. Приверженность пациента к лечению и соблюдению назначений может стать инструментом, который снизит тревожность и нервозность на время болезни.

Предлагаемая мультисервисная система «Клиентский медицинский веб-сервис» будет выполнять функции информационного обеспечения пациента. По результатам проведенного опроса установлена, что качество и достоверность информации о своем здоровье стоит на первом месте для пациента. Пациенты действительно могут вносить медицинские данные самостоятельно, после чего будет следовать процесс сверки информации со стороны медицинского учреждения, тем самым значительно повышая качество информации [10]. На пациента ляжет ответственность по управлению правами доступа к своей персональной медицинской информации, тем самым разрешая или запрещая чтение данных тому или иному медицинскому учреждению. По нашему мнению, такое управление доступом как минимум позволяет повысить безопасность информации, ее использование сторонними лицами становится ограниченным.

Респонденты отмечают, что несовершенство цифровых систем в здравоохранении является существенной проблемой, усугубляющей получение достоверной информации о состоянии своего здоровья. Развитие информационных технологий в российском пространстве действительно сопряжено с рядом трудностей, однако текущие пути направлены на интеграцию новых подходов администрирования систем [8]. По нашему мнению, именно мультисервисные системы должны стоять в центре внимания как наиболее подходящие инструменты для обеспечения текущих потребностей населения в медицинском обслуживании.

Следует принять во внимание, что персонализированное медицинское сопровождение является основной целью Концепций развития [11], причем это достоверно будет улучшать мониторинг хронических заболеваний и своевременно вносить изменения в планы ведения пациентов [12]. Более того, это позволит решить вопросы, связанные с подбором медикаментозного лечения, поскольку информация о пациенте будет храниться в одном месте и дополняться по необходимости [13]. Ожидается, что мультисервисные системы станут решением многих сложных аспектов реализации медицинской информации.

Реализация мультисервисной системы «Клиентский медицинский веб-сервис» в перспективе изменит концепцию создания МИС. Заполнение базы данных (БД) осуществляется пациентом, что позволяет освободить штат сотрудников ЛПУ от выполнения рутинных и затратных по времени операций ввода

данных. Также пациент может являться лицом, контролирующим качество предоставляемой ему персональной медицинской информации, а у ЛПУ повышается ответственность за качество этой информации. В этом процессе положительную роль сыграет конкуренция между различными ЛПУ [14]. Таким образом, создание концепции медицинского веб-сервиса направлена на

повышение качества медицинского обслуживания населения Российской Федерации.

По результатам опроса сформулирована система связей между пациентом и медицинским учреждением, которая учитывает потребности обеих сторон. Детализированная концепция системы «Клиентский медицинский веб-сервис» представлена ниже (рис. 1).



Рис. 1. Карта системы «Клиентский медицинский веб-сервис»

Fig. 1. System map "Client medical web service"

Карта демонстрирует интерфейсы и модули системы, реализующие требования респондентов. Черные линии соответствуют переходам между информационными модулями, красные линии – управляющим связям в системе. Таким образом, пользователь через веб-

интерфейс управляет своей медицинской историей, включая информацию о посещении врачей, результатах обследований, анализы, диагностические изображения, журналы назначения и приема медикаментов. Система осуществляет контроль над выполнением медицинских

рекомендаций, назначений, реализуя обратную связь в виде сообщений-напоминаний.

Двукомпонентная система, по нашему мнению, является наиболее подходящим, обоснованным и отражающим потребности населения в медицинской информации решением. Информационная компонента – это функционал для накопления и централизованного хранения медицинской истории пользователя, включая сведения о посещениях врачей, результатах обследований и их анализах, журналов назначений и приема медикаментов. Вторая компонента системы относится к набору сервисов, которые контролируют выполнение медицинских рекомендаций и назначений. Причем набор сервисов должен быть устроен таким образом, чтобы управлять процессом передачи данных информационной компоненты.

Предлагаемая нами концепция системы позволяет сформулировать основные требования, выполнение которых является необходимым для соответствия потребностей пациентов:

1) поддержка консистентности данных (согласованность данных друг с другом, целостность и их внутренняя не-противоречивость);

2) возможность хранения видео-, аудиофайлов, изображений, текстовых данных, обеспечивающая пользователю хранение и последующее использование персональной медицинской диагностической информации;

3) контроль доступа к пользовательским данным и идентификация пользователей, необходимые для работы системы в компьютерных сетях (это требование реализуется на этапе разработки подсистемы аутентификации и контроля доступа пользователей);

4) горизонтальное масштабирование системы – добавления дополнительных узлов инфраструктуры (дробление на ряд мелких структурных элементов и размещение по отдельным ЭВМ или использование нескольких серверов), каждый из которых может взять на себя часть нагрузки остальных [14]; горизонтальная масштабируемость инфраструктуры системы обеспечит возможность быстрого наращивания вычислительных мощностей и распределения задач между ними;

5) использование свободных и открытых программных средств обеспечит возможность более широкого использования, простую интеграцию системы с существующими коммерческими решениями и возможность развёртывания веб-сервиса в любых популярных операционных системах, чтобы обеспечить свободу в выборе аппаратной базы.

Техническая архитектура хранения и обработки данных может быть реализована с помощью системы связанных модулей. На рисунке 2 представлена предполагаемая архитектура подобной системы.

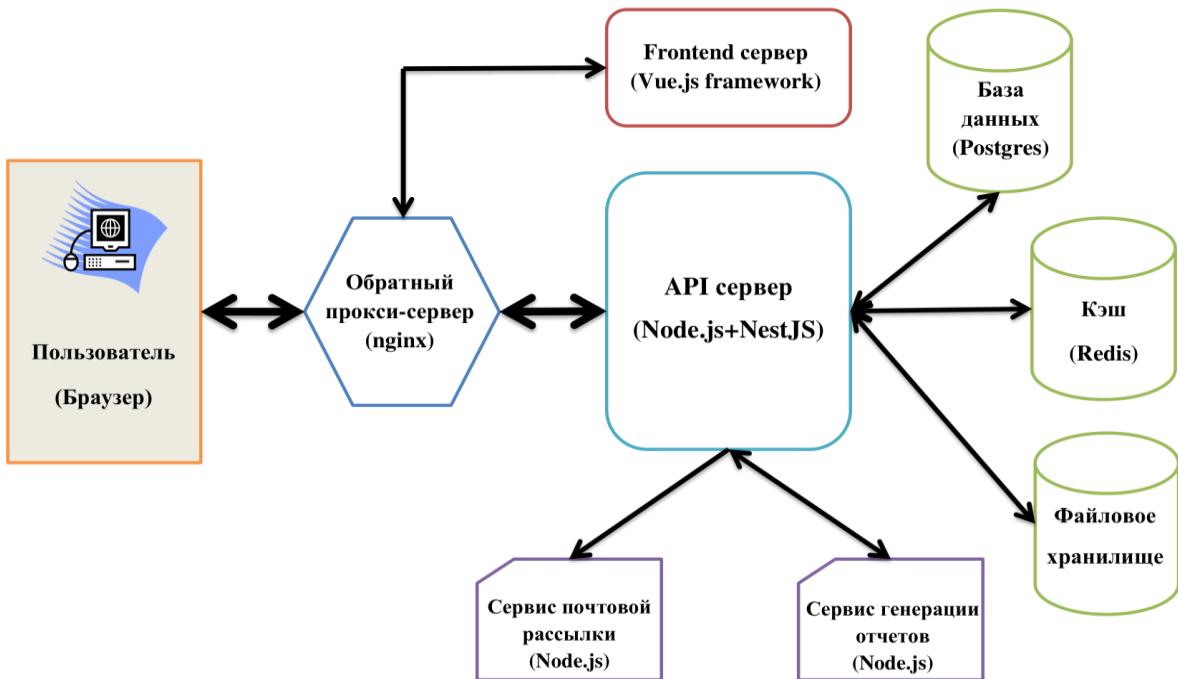


Рис. 2. Архитектура системы «Клиентский медицинский веб-сервис»

Fig. 2. Architecture of the system "Client medical web service"

Доступ и взаимодействие пользователя с системой может осуществляться посредством клиентского web-приложения (браузера), загруженного с frontend-сервера [3]. Клиентское приложение реализуется с применением web-технологий и библиотеки Vue.js. Обмен информацией и данными между клиентом и сервером в таком случае будет осуществляться по HTTPS-протоколу, что обеспечивает высокий уровень безопасности передаваемых через сеть медицинских данных. Обратный прокси-сервер в данной системе является первым звеном, обрабатывающим запросы клиента. Его использование позволяет оптимизировать обработку запросов и контролировать нагрузку на отдельные узлы системы. Наиболее часто загружаемые пользователями статичные файлы

(изображение, видео, клиентский код) могут кэшироваться на данном этапе обработки. Запросы к API, организованные в рамках архитектурного стиля REST, передаются на выделенный API-сервер. Логика сервера реализуется средствами Node.js и фреймворком NestJS. Хранение и кэширование данных реализуется с помощью СУБД Postgres и Redis соответственно. Отметим, что использование СУБД Postgres позволяет оптимально хранить текстовую медицинскую информацию [15]. Однако для хранения визуальных, звуковых и прочих медицинских данных (в т. ч. и специализированных форматов, например DICOM) более оптимально использование файловых хранилищ [16]. Поэтому для их хранения архитектура предусматривает использование выделенного файлового

хранилища. Оно может быть реализовано, в формате облачного хранилища.

Сервисные функции (почтовая рассылка, генерация отчётов, планировщик задач) вынесены в отдельные приложения-сервисы для более устойчивой работы и возможности масштабирования сервиса при росте нагрузок [17]. Они также реализованы с применением Node.js, что обеспечит высокую производительность и скорость выполнения задач. Поскольку доступность использования сервиса является одной из существенных преград во внедрении подобных систем, интеграция сервисных функций данным способом улучшит качество информации и ее хранение и использование в дальнейшем.

Выводы

На основе проведенного опроса установлено, что наиболее значимыми требованиями к информационным

системам медицинской направленности являются личное участие пациента, удобство использования и скорость передачи информации между различными учреждениями. В соответствии с этим была сформулирована концепция мультисервисной системы «Клиентский медицинский веб-сервис», которая учитывает основные потребности: качество информации, ее хранение и использование, сервисное обслуживание. Разработана техническая архитектура МИС, описывающая необходимые элементы и технологии, оптимальных для реализации сформулированной концепции. Практическая реализация предложенной мультисервисной системы «Клиентский медицинский веб-сервис» позволит достичь интегрированного подхода к управлению медицинской информацией, ее хранению и использованию как пациентом, так и медицинскими учреждениями.

Список литературы

1. Current challenges and potential solutions to the use of digital health technologies in evidence generation: a narrative review / H. Mumtaz, M. H. Riaz, H. Wajid, M. Saqib, M. H. Zeeshan, S. E. Khan, Y. R. Chauhan, H. Sohail, L. I. Vohra // Front. Digit. Health. 2023. N 5. P. 1203945. <https://doi.org/10.3389/fdgth.2023.1203945>
2. The promise of digital healthcare technologies / A. W. K. Yeung, A. Torkamani, A. J. Butte [et al.] // Frontiers in public health. 2023. N 11. P. 1196596. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1196596>
3. Epizitone A., Moyane S. P., Agbehadji I. E. Systematic literature review of health information systems for healthcare // Healthcare (Basel). 2023. N 11(7). P. 959. <https://doi.org/10.3390/healthcare11070959>
4. Campbell I. H., Rudan I. Helping global health topics go viral online // Journal of global health. 2020. N 8(1). P. 010101. <https://doi.org/10.7189/jogh.10.010101>

5. Gorbunov N., Kuleshova V., Korzhuk V. Organizational and law aspects of medical information systems // International Research Journal. 2024. N 4(142). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.38>
6. Эльянов М. Медицинские информационные технологии. URL: <https://www.armit.ru/catalog/> (дата обращения: 17.06.2025).
7. Липатов В. А., Зайцев И. Г., Северинов Д. А. О проблемах внедрения IT-систем в практическое здравоохранение // Бюллетень сибирской медицины. 2018. Т. 17, № 1. С. 177–190. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2018-1-177-190>
8. Медицинская информационная система БАРС как средство оптимизации системы управления ЛПУ / М. А. Полиданов, О. Д. Ерошина, И. С. Блохин, А. А. Скородод, С. Г. Алиева, И. В. Щербакова // Modern Science. 2020. № 2-1. С. 233-237.
9. Telemedicine and digital health applications in vascular surgery / F. Lareyre, H. Chaptoukaev, S. C. Kiang, A. Chaudhuri, C. A. Behrendt, M. A. Zuluaga, J. Raffort // Journal of clinical medicine. 2022. N 11(20). P. 6047. <https://doi.org/10.3390/jcm11206047>
10. Digital health technology for real-world clinical outcome measurement using patient-generated data: Systematic scoping review / E. Pyper, S. McKeown, J. Hartmann-Boyce, J. Powell // J. Med. Internet. Res. 2023. N 25. P. e46992. <https://doi.org/10.2196/46992>
11. Проблемы и перспективы информационных технологий в здравоохранении России: современные реалии / И. В. Борисов, В. А. Бондарь, Д. А. Кудинов, Ю. Ю. Некрасова, М. М. Канарский, П. Прадхан, В. С. Сорокина, И. В. Редкин, А. В. Гречко, М. В. Петрова // Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. 2022. Т. 4, № 4. С. 271–282.
12. Li Z. The impact and benefits of digital health management systems on chronic disease management // BIO Web of Conferences. 2024. N 111. P. 03005. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202411103005>
13. Development of artificial intelligence powered apps and tools for clinical pharmacy services: A systematic review / F. Ranchon, S. Chanoine, S. Lambert-Lacroix, J. L. Bosson, A. Moreau-Gaudry, P. Bedouch // International journal of medical informatics. 2023. N 172. P. 104983. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2022.104983>
14. Гортон И. Масштабирование систем. Основы и проектирование распределенных архитектур. Астана: Фолиант, 2024. 336 с.
15. Осипов Д. Л. Технология проектирования баз данных. М.: ДМК Пресс, 2019. 498 с.
16. Digital Imaging and Communications in Medicine Standard (DICOM) // NEMA. URL: <https://www.nema.org/Standards/view/Digital-Imaging-and-Communications-in-Medicine> (дата обращения: 17.06.2025).
17. Раджпут Д. Spring. Все паттерны проектирования. СПб.: Питер, 2019. 312 с.

References

1. Mumtaz H., Riaz M.H., Wajid H., Saqib M., Zeeshan M.H., Khan S.E., Chauhan Y.R., Sohail H., Vohra L.I. Current challenges and potential solutions to the use of digital health technologies in evidence generation: a narrative review. *Front. Digit. Health.* 2023;(5):1203945. <https://doi.org/10.3389/fdgh.2023.1203945>
2. Yeung A.W.K., Torkamani A., Butte A.J., et al. The promise of digital healthcare technologies. *Frontiers in Public Health.* 2023;(11):1196596. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1196596>
3. Epizitone A., Moyane S.P., Agbehadji I.E. Systematic literature review of health information systems for healthcare. *Healthcare (Basel).* 2023;(11):959. <https://doi.org/10.3390/healthcare11070959>
4. Campbell I.H., Rudan I. Helping global health topics go viral online. *Journal of Global Health.* 2020; (8):010101. <https://doi.org/10.7189/jogh.10.010101>
5. Gorbunov N., Kuleshova V., Korzhuk V. Organizational and law aspects of medical information systems. *International Research Journal.* 2024;(4). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.38>
6. Elyanov M. Medical information technologies. (In Russ.). Available at: <https://www.armit.ru/catalog/> (accessed 17.06.2025).
7. Lipatov V.A., Zaitsev I.G., Severinov D.A. On the problems of implementing IT systems in practical healthcare. *Byulleten' sibirskoi meditsiny = Bulletin of Siberian Medicine.* 2018;17(1):177–190. (In Russ.) <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2018-1-177-190>
8. Polidanov M.A., Eroshina O.D., Blokhin I.S., Skorokhod A.A., Alieva S.G., Shcherbakova I.V. The BARS medical information system as a means of optimizing the health care management system. *Modern Science.* 2020;(2-1):233–237. (In Russ.)
9. Lareyre F., Chaptoukaev H., Kiang S.C., Chaudhuri A., Behrendt C.A., Zuluaga M.A., Raffort J. Telemedicine and digital health applications in vascular surgery. *Journal of Clinical Medicine.* 2022;(11):6047. <https://doi.org/10.3390/jcm11206047>
10. Pyper E., McKeown S., Hartmann-Boyce J., Powell J. Digital health technology for real-world clinical outcome measurement using patient-generated data: Systematic scoping review. *J. Med. Internet. Res.* 2023;(25):e46992. <https://doi.org/10.2196/46992>
11. Borisov I.V., Bondar V.A., Kudinov D.A., Nekrasova Y.Y., Kanarsky M.M., Pradhan P., Sorokina V.S., Redkin I.V., Grechko A.V., Petrova M.V. Problems and prospects of information technologies in healthcare in Russia: modern realities. *Fizicheskaya i reabilitatsionnaya meditsina, meditsinskaya reabilitatsiya = Physical and Rehabilitation Medicine, Medical Rehabilitation.* 2022;4(4):271–282. (In Russ.)
12. Li Z. The impact and benefits of digital health management systems on chronic disease management. *BIO Web of Conferences.* 2024;(111):03005. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202411103005>

13. Ranchon F., Chanoine S., Lambert-Lacroix S., Bosson J. L., Moreau-Gaudry A., Bedouch P. Development of artificial intelligence powered apps and tools for clinical pharmacy services: A systematic review. *International Journal of Medical Informatics.* 2023;(172):104983. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2022.104983>
14. Gorton I. Scaling of systems. Fundamentals and design of distributed architectures. Astana: Foliant; 2024. 336 p. (In Russ.)
15. Osipov D.L. Database design technology. Moscow: DMK Press; 2019. 498 p. (In Russ.)
16. Digital Imaging and Communications in Medicine Standard (DICOM). NEMA. Available at: <https://www.nema.org/Standards/view/Digital-Imaging-and-Communications-in-Medicine> (accessed 17.06.2025).
17. Rajput D. Spring. All design patterns. Saint Petersburg: Peter; 2019. 312 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Коваленко Максим Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики и информационных систем, Кубанский государственный университет, г. Краснодар, Российская Федерация, e-mail: m.s.kovalenko@ya.ru

Григорьян Анастасия Леонтиевна, ассистент кафедры нормальной физиологии, Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: ms.bucky@mail.ru, ORCID: 0009-002-8458-1211

Сахно Дарья Александровна, студент, Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: dsakhno225@gmail.com

Григорьян Ольга Леонтиевна, студент, Воронежский государственный медицинский университет им. Н. Н. Бурденко, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: s_mullert@mail.ru

Maksim S. Kovalenko, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Information Systems, Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation, e-mail: m.s.kovalenko@ya.ru

Anastasiia L. Grigorian, Assistant of the Department of Normal Physiology, Belorusian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus, e-mail: ms.bucky@mail.ru, ORCID: 0009-002-8458-1211

Daria A. Sakhno, Student, I. M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenovskiy University), Moscow, Russian Federation, e-mail: dsakhno225@gmail.com

Olga L. Grigorian, Student, N. N. Burdenko Voronezh State Medical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: s_mullert@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-21-39>

УДК 691.326

Программно-информационная система оценивания когнитивных способностей сотрудников и кандидатов в HR-отделах

Р. А. Томакова¹✉, А. В. Малышев¹, А. В. Быков¹

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

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Резюме

Цель исследования заключается в разработке программно-информационной системы для автоматизации оценки когнитивных способностей сотрудников и кандидатов с использованием научно обоснованных методик тестирования в HR-отделах.

Методы. Для реализации программно-информационной системы был использован язык программирования C# с применением фреймворка ASP.NET Core, а также язык программирования JavaScript с применением библиотеки React. Для хранения данных о пользователях, результатах тестирования и отчётах применялась СУБД MSSQL. Для реализации системы использовались следующие научно обоснованные методики: «Таблицы Шульте» (Г. Шульте) для измерения концентрации внимания, «Методика запоминания пар слов» (Г. Эббингауз) для оценки кратковременной памяти, «Прогрессивные матрицы Раэна» (Дж. Раэн) для анализа логического мышления, «Тест Холмса и Рея» (Т. Холмс, Р. Рей) для диагностики уровня стрессоустойчивости, а также «Методика Белбина» (Р. М. Белбин) для определения командных ролей. Входными данными для системы являются результаты тестов, которые впоследствии анализируются для построения отчётов и предоставления рекомендаций.

Результаты. Создана программно-информационная система, которая автоматизирует процесс оценки когнитивных способностей сотрудников и кандидатов. Реализованы интерфейсы для пользователей и HR-специалистов, обеспечивающие доступ к тестам, результатам и аналитике. Проведенное тестирование на выборке из сотрудников компании показало точность диагностики на уровне 93%. Система предоставляет возможности персонализированного и группового анализа, включая генерацию рекомендаций для развития навыков и построение сводных отчётов, что делает её эффективным инструментом для HR-отделов. Результаты тестирования показали, что система полностью удовлетворяет функциональным требованиям и готова к использованию.

Заключение. Разработанная программно-информационная система обеспечивает высокую точность диагностики и экономит время специалистов за счёт автоматизированной обработки данных. Перспективой развития является расширение функциональных возможностей, включая добавление новых методик тестирования, внедрение адаптивных алгоритмов и интеграция с HRM-системами для оптимизации процессов управления персоналом.

Ключевые слова: когнитивное тестирование; HR-отдел; таблицы Шульте; прогрессивные матрицы Раэна; стрессоустойчивость; веб-приложение; автоматизация; тестирование; командные роли.

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

Для цитирования: Томакова Р. А., Малышев А. В., Быков А. В. Программно-информационная система оценивания когнитивных способностей сотрудников и кандидатов в HR-отделах // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 3. С. 21–39. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-21-39>

Поступила в редакцию 15.07.2025

Подписана в печать 14.08.2025

Опубликована 30.09.2025

© Томакова Р. А., Малышев А. В., Быков А. В., 2025

Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering,
Information Science. Medical Instruments Engineering. 2025;15(3):21–39

Development of a software and information system for testing the emotional sphere of a person

Rimma A. Tomakova¹✉, Alexander V. Malyshev¹, Andrey V. Bykov¹

¹Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation
✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop a software and information system for automating the assessment of cognitive abilities of employees and candidates using scientifically validated testing methodologies in HR departments.

Methods. To implement the software system, the C# programming language was used with the ASP.NET Core framework, along with JavaScript and the React library. For storing data on users, testing results, and reports, the MSSQL database was utilized. The following scientifically validated methodologies were employed: "Schulte Tables" (G. Schulte) to measure attention concentration, "Pair Word Memorization Method" (H. Ebbinghaus) to assess short-term memory, "Raven's Progressive Matrices" (J. Raven) to analyze logical thinking, "Holmes and Rahe Stress Scale" (T. Holmes, R. Rahe) to evaluate stress resilience, and "Belbin's Methodology" (R. M. Belbin) to determine team roles. The system uses test results as input data, which are subsequently analyzed to generate reports and provide recommendations.

Results. During the development, a software and information system was created to automate the process of assessing cognitive abilities of employees and candidates. Interfaces for users and HR specialists were implemented, providing access to tests, results, and analytics. Testing on a sample of company employees demonstrated a diagnostic accuracy level of 93%. The system offers personalized and group analysis capabilities, including generating recommendations for skill development and building summary reports, making it an effective tool for HR departments. The testing results showed that the developed software fully meets functional requirements and is ready for use.

Conclusion. The developed software and information system enables the automation of cognitive testing processes for employees and candidates, providing HR departments with a convenient tool for evaluating key skills and developing development plans. The system ensures high diagnostic accuracy and saves specialists' time through automated data processing. Future development prospects include expanding functionality, adding new testing methodologies, implementing adaptive algorithms for dynamically adjusting task complexity, and integrating with HRM systems to optimize personnel management processes.

Keywords: cognitive testing; HR department; Schulte tables; Raven's progressive matrices; stress resilience; web application; automation; testing; team roles.

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

For citation: Tomakova R.A., Malyshev A.V., Bykov A.V. A specialized multifunctional online platform for the formation of a university's digital career environment. *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(3):21–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-21-39>

Введение

Современные реалии требуют от сотрудников не только высокого уровня профессионализма, но и развитых когнитивных навыков, таких как внимание, память, логическое мышление, стрессоустойчивость и умение эффективно работать в команде. Эти качества определяют способность человека справляться с рабочими вызовами и вносят значительный вклад в общую производительность организации, поэтому они должны учитываться в процессах найма, адаптации и профессионального развития для успешного управления персоналом. Все это делает когнитивное тестирование ключевым инструментом в работе HR-отделов [1].

Традиционные методы тестирования [2] зачастую предполагают ручное проведение оценок, что связано с большими временными и материальными затратами. Более того, такие подходы нередко подвержены субъективности и недостаточной точности результатов. С развитием информационных технологий автоматизация процессов оценки сотрудников становится всё более актуальной, так как она позволяет не только снизить погрешность анализа, но и значительно ускорить обработку данных. Программно-информационные системы, способные выполнять такие функции, приобретают всё большую значимость для управления человеческим капиталом.

Цифровизация когнитивного тестирования с использованием научно обоснованных методик открывает дополнительные

возможности для оценки и развития персонала. Адаптированные к онлайн-среде методы позволяют объективно оценивать когнитивные способности сотрудников, предоставлять индивидуальные рекомендации по их профессиональному росту, учитывать групповую динамику и взаимодействие в команде. В условиях быстро меняющихся требований в различных отраслях, где от человека требуется гибкость, высокая концентрация и способность к оперативному принятию решений, такие нововведения становятся все более необходимыми [3].

Применение автоматизированных систем способствуют более быстрому выявлению сильных и слабых сторон сотрудников, оптимизации процесса формирования команд и корректировке программ обучения. Они помогают HR-отделам решать стратегические задачи, направленные на повышение эффективности персонала.

Основной целью данного исследования является разработка программно-информационной системы, которая объединяет проверенные методики когнитивного тестирования, адаптированные под цифровую среду, и предоставляет HR-специалистам удобный инструмент для оценки, анализа и планирования профессионального развития сотрудников и кандидатов.

Материалы и методы

Для организации хранения и эффективного управления информацией о

пользователях, HR-специалистах и применяемых методиках была создана база данных (БД). В её основу легла структура, позволяющая обеспечить надёжность, быстродействие и масштабируемость системы. Для реализации БД был выбран Microsoft SQL Server (MSSQL) благодаря его высокой производительности [4], поддержке сложных запросов и надёжности при обработке больших объёмов данных [5]. MSSQL обеспечивает безопасность хранимой информации,

простоту интеграции с серверной частью системы на ASP.NET Core и возможности для оптимизации запросов [6]. Рассмотренная архитектура позволяет эффективно работать с данными, обеспечивая их доступность для анализа и формирования отчёtnости.

На рисунке 1 представлена концептуальная модель данных в виде диаграммы, которая отражает основные сущности и их взаимосвязи.

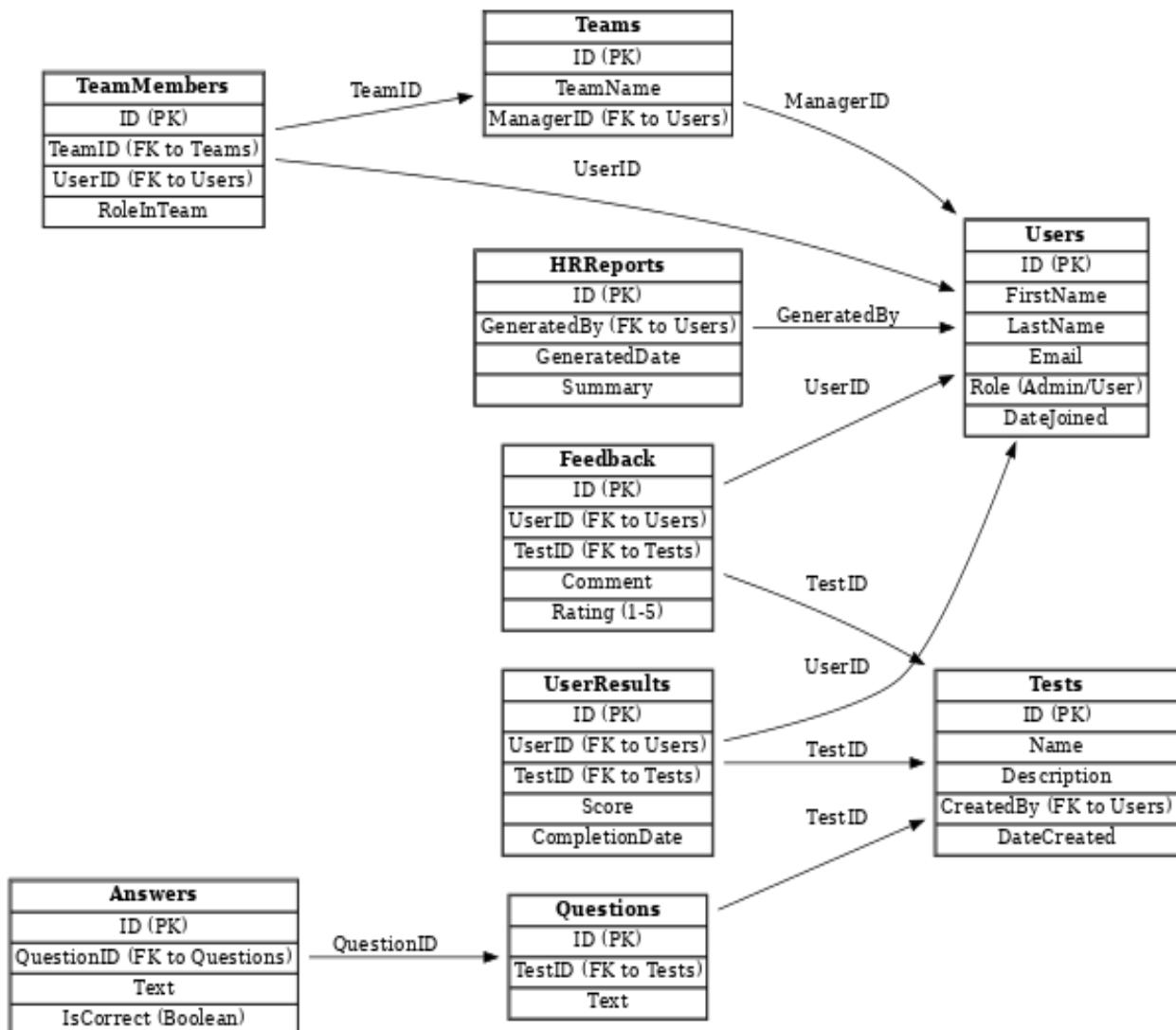


Рис. 1. Концептуальная модель данных информационной системы

Fig. 1. Conceptual data model of an information system

В программе предусмотрены две основные роли — это пользователь (кандидат) и HR. В соответствии с их потребностями были реализованы функциональные требования.

Функционал, доступный пользователю:

1. Авторизация в личном кабинете.
2. Прохождение тестов.
3. Просмотр результатов выполненных тестов.
4. Сортировка результатов по дате выполнения.
5. Редактирование персональных данных в личном кабинете.

- Функционал, доступный HR:
1. Авторизация в личном кабинете HR.
 2. Просмотр содержимого тестов.
 3. Просмотр результатов тестирования кандидатов.
 4. Фильтрация результатов тестирования по имени пользователя и дате прохождения.
 5. Редактирование персональных данных в личном кабинете.

На рисунке 2 продемонстрирована диаграмма прецедентов, на которой показан функционал разработанного программного продукта.

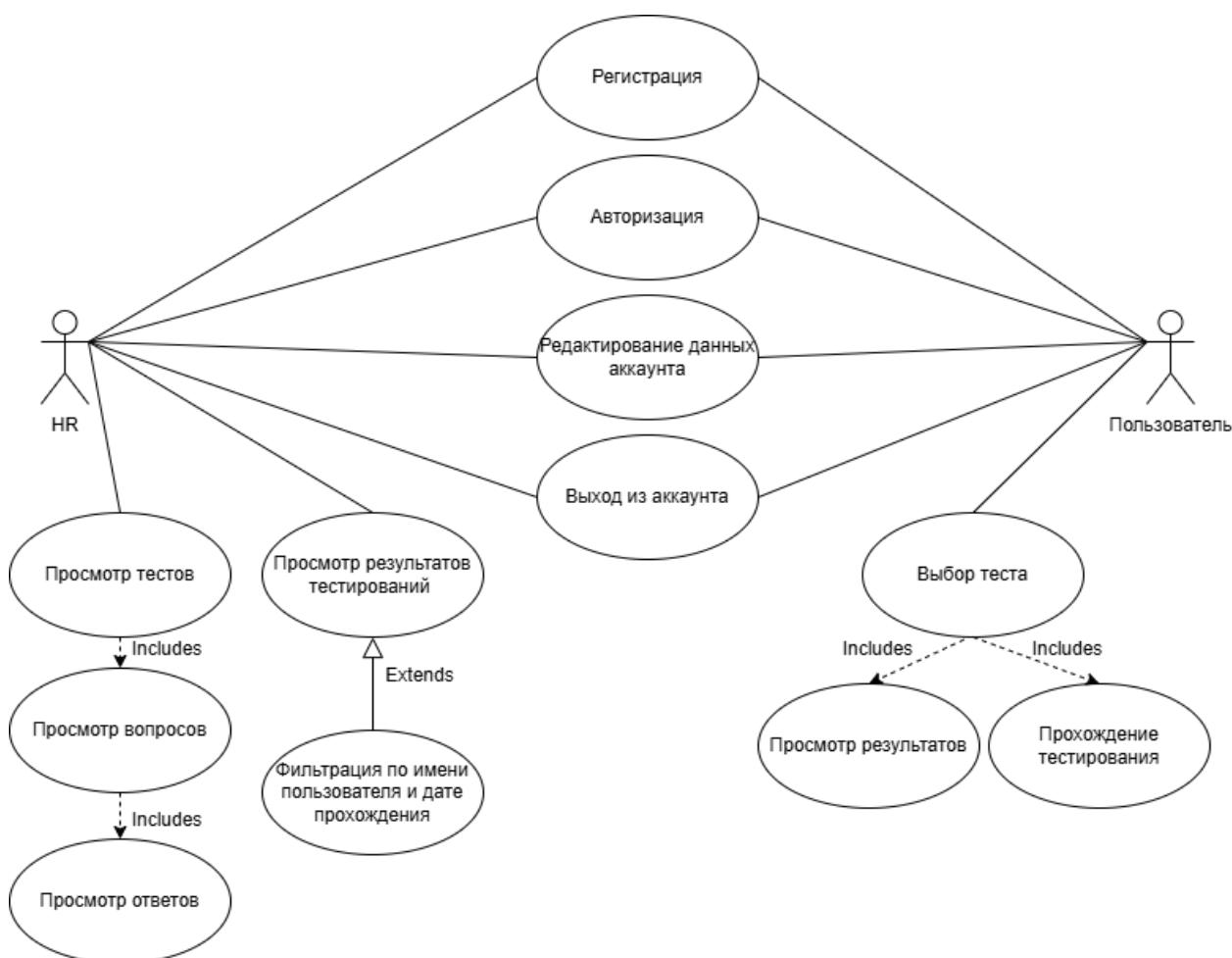


Рис. 2. Диаграмма прецедентов для программной системы

Fig. 2. Use case diagram for a software system

Согласно требованиям к программной системе, в рамках проекта были реализованы сценарии действий HR при анализе результатов тестирования отдельного пользователя. Данные

сценарии представлены в виде диаграммы (рис. 3). Рисунок 4 демонстрирует диаграмму последовательности действий пользователя при прохождении тестирования.



Рис. 3. Диаграмма последовательности для HR

Fig. 3. Sequence diagram for a HR



Рис. 4. Диаграмма последовательности прохождения тестирования

Fig. 4. Diagram of the sequence of passing the test

Для создания информационной системы, предназначенной для когнитивного тестирования сотрудников и кандидатов в HR-отделах, были выбраны научно обоснованные и широко применяемые в психологической практике методики. Эти подходы позволяют проводить точную и объективную оценку ключевых когнитивных способностей и эмоциональных характеристик пользователей, что играет важную роль при принятии решений о найме, адаптации и развитии персонала. Применение этих методов в цифровом формате делает процесс тестирования более удобным, масштабируемым и точным, что особенно актуально в условиях современных HR-процессов.

Оценка внимания проводится с помощью методики «Таблицы Шульте» [7]. Этот подход заключается в последовательном поиске чисел в таблице в возрастающем порядке, что позволяет оценивать такие важные параметры, как концентрация внимания, скорость реакции и устойчивость к внешним отвлекающим факторам [8]. Чем меньше времени требуется участнику теста для выполнения задания, тем выше уровень его концентрации. Этот метод особенно полезен для выявления сотрудников, способных эффективно справляться с заданиями в условиях многозадачности и высокого уровня ответственности [9].

Кратковременная память претендента анализируется с использованием «Методики запоминания пар слов» [10]. Испытуемому предлагается запомнить

определенное количество пар слов, после чего система оценивает точность воспроизведения. Данная методика помогает выявить способности к ассоциативному запоминанию и устанавливает уровень кратковременной памяти, что особенно важно для должностей, требующих запоминания большого объема информации за короткий промежуток времени.

Логическое мышление оценивается с использованием методики «Прогрессивные матрицы Равена» [11], которые являются одним из наиболее популярных тестов для анализа способности к абстрактному мышлению [12]. В рамках этой методики участник должен найти недостающий элемент в логической последовательности. Данный подход позволяет оценить уровень аналитического мышления, способность выявлять закономерности и находить оптимальные решения [13].

Стрессоустойчивость диагностируется с помощью методики «Тест Холмса и Рея» [14]. Методика направлена на определение уровня стресса и способности пользователя справляться с жизненными трудностями. Она включает анализ различных жизненных событий, их частоты и интенсивности воздействия на человека, что может позволить HR-специалистам выявлять сотрудников с высоким уровнем устойчивости к стрессу. Это особенно важно для должностей, связанных с работой в сложных и нестабильных условиях.

Определение командных ролей проводится на основе «Методики Белбина» [15]. В рамках теста участник отвечает на вопросы, после чего система анализирует его предпочтения в командной работе и определяет роль, которую он наиболее эффективно может выполнять (например, лидер, аналитик, исполнитель и т. д.) [16]. Это помогает HR-специалистам формировать гармоничные команды, где каждый участник выполняет задачи, соответствующие его сильным сторонам [17].

Каждая из методик, применяемых в разработанной системе, имеет чётко прописанный алгоритм анализа данных. Например, в методике «Таблицы Шульте» система фиксирует время выполнения задания, на основе которого рассчитывается показатель концентрации [7]. В методике «Прогрессивные матрицы Равена» учитывается количество правильных ответов и время на выполнение каждого задания, что позволяет глубже оценить уровень логического мышления [11].

Система автоматизирует подсчёт результатов тестирования, что исключает вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором. Итоговые данные представляются в виде индивидуальных и групповых отчётов. Индивидуальные отчёты включают в себя анализ сильных и слабых сторон, рекомендации по развитию, а групповые позволяют HR-специалистам оценить общую картину когнитивных способностей в

организации, выявить общие тенденции и проблемы.

Таким образом, разработанная система становится эффективным инструментом для HR-отделов, способная обеспечить точность анализа и удобство использования. Она не только позволяет выявлять когнитивные преимущества и недостатки сотрудников, но и помогает формировать стратегии их профессионального развития, что, в свою очередь, способствует повышению эффективности работы организации в целом.

Результаты и их обсуждение

Для создания информационной системы была использована программная среда Visual Studio, которая представляет мощный инструмент для разработки современных программных продуктов. Основной веб-сервис реализован на языке программирования C# с использованием фреймворка ASP.NET Core. Выбор среды обусловлен высокой производительностью платформы [18], её удобством на всех стадиях разработки, а также наличием обширного набора инструментов для интеграции, тестирования и развертывания.

Для клиентской части была использована библиотека React, известная своей гибкостью [19] и широкими возможностями в создании интерактивных пользовательских интерфейсов [20]. React обеспечивает компонентный подход к разработке [21], что упрощает поддержку и масштабирование системы [22]. Применение этой библиотеки также позволило

реализовать современные подходы к обработке событий на стороне клиента для повышения отзывчивости и удобства работы с приложением.

На рисунке 5 изображена диаграмма компонентов разработанной программной системы.

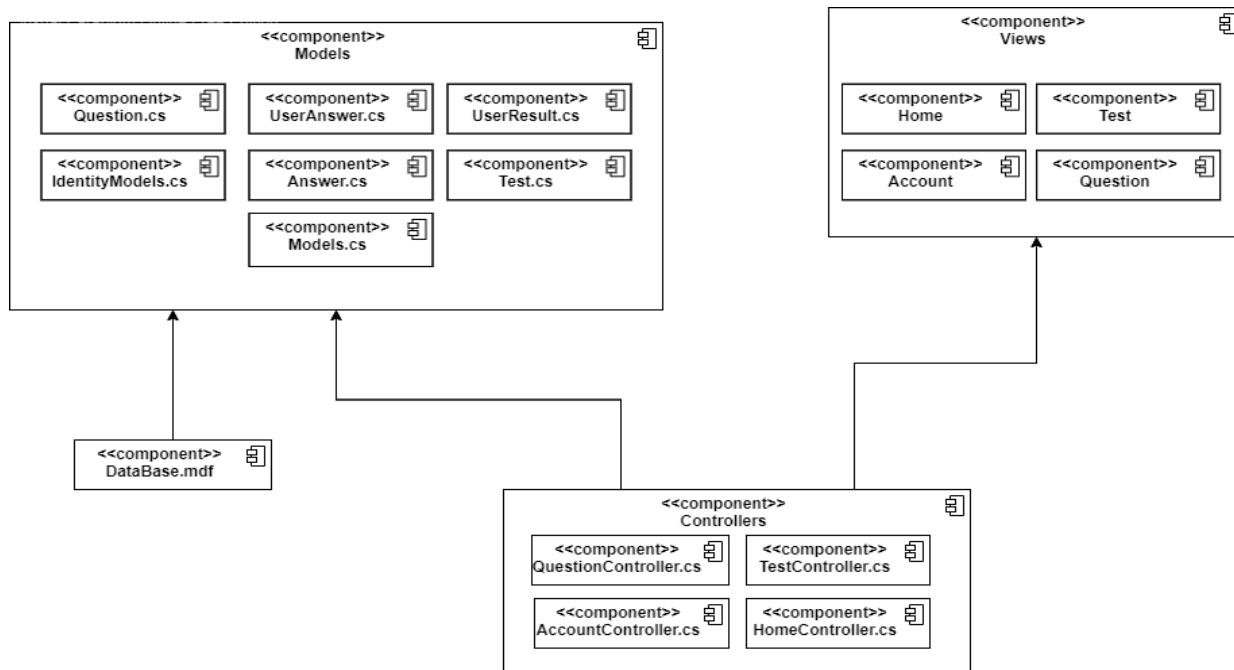


Рис. 5. Диаграмма компонентов программной системы

Fig. 5. Diagram of software system components

После запуска приложения пользователь попадает на главную страницу с приветственным текстом (рис. 6). В случае наличия учетной записи можно

нажать на кнопку «Вход» или перейти к созданию аккаунта, нажав на соответствующую кнопку «Регистрация».

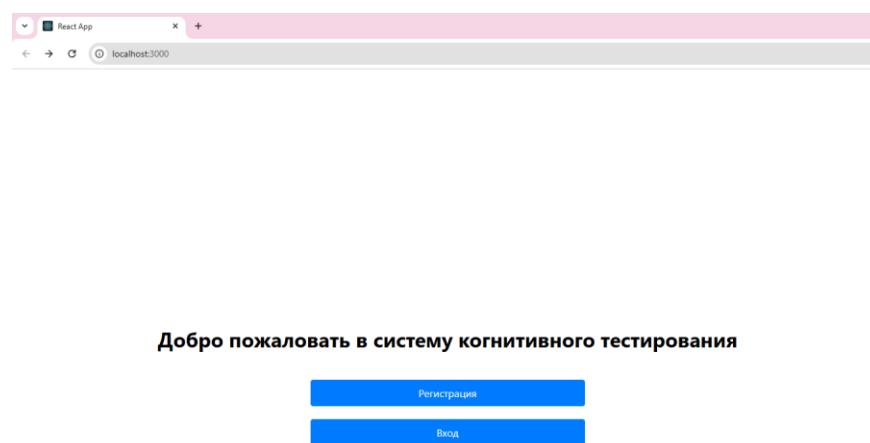


Рис. 6. Главная страница

Fig. 6. Main page

На рисунке 7 можно увидеть страницу регистрации. Она включает в себя форму с личными данными пользователя.

Для создания аккаунта необходимо ввести имя, фамилию, e-mail, а также придумать пароль.

Рис. 7. Страница регистрации

Fig. 7. Registration page

Реализация авторизации в системе основана на использовании современных безопасных подходов к управлению доступом пользователей. Все пароли хранятся в зашифрованном виде с использованием алгоритма хэширования, что исключает возможность их прямого доступа. При авторизации пользователь вводит свой логин и пароль, которые сверяются с данными, хранящимися в базе данных. Для управления сессиями используется механизм токенов на основе технологии JSON Web Token (JWT) для обеспечения защищённого доступа к ресурсам системы и эффективного разграничения прав между различными категориями пользователей, такими как

HR-специалисты и кандидаты. Выбранный подход гарантирует безопасность данных и удобство работы с системой. Реализованную страницу авторизации можно увидеть ниже (рис. 8).

После входа в учетную запись пользователь попадает на страницу личного кабинета. В зависимости от роли в системе будет отличаться доступный функционал. Рассмотрим страницу HR-специалиста (рис. 9).

После произведения авторизации пользователь имеет возможность открыть страницу редактирования профиля (рис. 10). Здесь можно изменить личные данные, поменять фамилию, имя, отчество.

Авторизация

Email:
example@mail.com

Пароль:
Ваш пароль

Войти Регистрация

Рис. 8. Страница авторизации

Fig. 8. Authorization page



Личный кабинет HR

Редактировать профиль

Тесты

Рис. 9. Страница личного кабинета HR

Fig. 9. HR account page

Редактирование профиля

Фамилия:
Фамилия

Имя:
Имя

Отчество:
Отчество

Сохранить

Назад

Рис. 10. Страница редактирования профиля

Fig. 10. Edit profile page

Также пользователь может перейти на страницу с выбором теста для дальнейшего прохождения. Предусмотрен поиск по названию методики, а также реализовано постраничное отображение. Рядом с каждым пунктом в списке

присутствует кнопка «Начать» для запуска тестирования, а также кнопка «Результаты» для просмотра отчетов по прошлым попыткам. Реализованную страницу со списком тестов можно увидеть ниже (рис. 11).

Тест	Действия
Таблицы Шульте	Начать Результаты
Методика запоминания пар слов	Начать Результаты
Прогрессивные матрицы Равена	Начать Результаты
Тест Холмса и Рея	Начать Результаты
Методика Белбина	Начать Результаты

1 2
Назад

Рис. 11. Страница тестов для HR

Fig. 11. Page with tests for HR

На рисунке 12 показана страница с результатами тестирования. Предусмотрена фильтрация по дате прохождения заданий, а также поиск по Ф.И.О.

участника. Кроме того, также реализовано постраничное отображение для упрощенной навигации по результатам.

ФИО	Дата завершения	Результат	Время выполнения
Иванов Иван Иванович	2024-12-01	Быстрое внимание	32 сек.
Петров Петр Петрович	2024-12-03	Среднее внимание	45 сек.
Сидоров Сидор Сидорович	2024-12-05	Медленное внимание	60 сек.
Васильева Анна Николаевна	2024-12-02	Быстрое внимание	30 сек.
Кузнецов Михаил Андреевич	2024-12-04	Среднее внимание	50 сек.

1 2
Назад

Рис. 12. Страница с результатами тестирования

Fig. 12. Results page

Для оценки эффективности разработанной системы было проведено её тестирование на выборке из 50 сотрудников компании, разделённых на группы в зависимости от их профессиональных обязанностей. Выборка включала:

1) 10 сотрудников отдела продаж, чья работа требует высокого уровня концентрации и стрессоустойчивости;

2) 15 сотрудников административного отдела, для которых важны когнитивные навыки, такие как память и внимание;

3) 10 сотрудников ИТ-отдела, чья деятельность связана с логическим мышлением и аналитическими способностями;

4) 15 сотрудников производства, где ключевую роль играют внимание и устойчивость к отвлекающим факторам.

Каждая группа сотрудников проходила серию тестов, адаптированных под их профессиональные задачи. Например, сотрудники отдела продаж в основном выполняли тесты на стрессоустойчивость (методика Холмса и Рея) и внимание (таблицы Шульте), тогда как для ИТ-специалистов был акцент на логическое мышление (прогрессивные матрицы Равена) и память (методика запоминания пар слов).

В процессе проведения тестирования были собраны и проанализированы следующие показатели:

1. Время выполнения заданий. Среднее время выполнения теста «Таблицы Шульте» составило 35 с, при этом наилучшие результаты показали

сотрудники ИТ-отдела (30 с), а сотрудники производства демонстрировали чуть более длительное время (40 с).

2. Точность выполнения тестов. В тесте «Прогрессивные матрицы Равена» сотрудники ИТ-отдела правильно выполнили 92% заданий, тогда как сотрудники административного отдела – 85%.

3. Уровень стрессоустойчивости. По результатам теста Холмса и Рея 70% сотрудников отдела продаж продемонстрировали высокий уровень устойчивости к стрессу, тогда как у сотрудников производства этот показатель составил 55%.

4. Память. В teste на запоминание пар слов средний показатель составил 8 из 10 правильно воспроизведённых пар. Лучшие результаты были зафиксированы у сотрудников административного отдела.

Выводы

Разработанная программно-информационная система для тестирования когнитивных способностей сотрудников и кандидатов в HR-отделах предоставляет широкий функционал, обеспечивающий автоматизацию ключевых процессов оценки. Она позволяет HR-специалистам удобно работать с результатами тестов, дает возможность фильтрации, сортировки, поиска и анализа данных. Реализованы механизмы обработки результатов на основе научно обоснованных методик, таких как тесты «Таблицы Шульте», «Методика запоминания пар слов», «Прогрессивные матрицы Равена» и другие.

Результаты тестирования показали, что система успешно справляется с задачей автоматизации оценки когнитивных и эмоциональных способностей сотрудников. Она обеспечивает:

1. Точность анализа (93% совпадений с результатами ручной обработки тестов, проведённых психологами).

2. Сокращение времени обработки (автоматизация позволила снизить временные затраты на обработку результатов на 40% по сравнению с традиционными методами).

3. Удобство анализа (HR-специалисты отметили удобный интерфейс системы, позволяющий легко находить и сортировать результаты по различным параметрам).

На основе проведённого тестирования и обратной связи от HR-специалистов были определены направления для дальнейшего развития системы. Они включают в себя интеграцию с существующими HRM-системами для значительного упрощения управления данными сотрудниками. Подобное внедрение обеспечит автоматическое обновление информации о пользователях, проведенных тестах и их результатах, минимизируя необходимость ручного ввода данных. Это, в свою очередь, ускорит процесс анализа и повысит общую эффективность работы HR-специалистов.

Дополнительно планируется расширение набора используемых методик тестирования. Внедрение оценки креативности, эмоционального интеллекта и других аспектов позволит охватить более широкий спектр когнитивных и личностных характеристик, что имеет особое значение для компаний,

работающих в сферах, требующих нестандартного подхода к задачам, высокой гибкости и эмоциональной устойчивости сотрудников. Также возможно внедрение адаптивных алгоритмов, которые будут подстраивать сложность заданий под уровень пользователя в режиме реального времени. Данное улучшение позволит получать более точные результаты тестирования, поскольку задания будут соответствовать индивидуальным особенностям каждого пользователя. Процесс диагностики станет более персонализированным и эффективным.

Также планируется улучшение пользовательского интерфейса системы. Внедрение более интуитивно понятных элементов навигации и расширение функциональности UI обеспечит комфортную работу с системой для кандидатов любого уровня подготовки. Сюда может входить упрощение процесса анализа данных, добавление визуализации результатов и расширение возможностей настройки системы под конкретные нужды HR-отделов.

Кроме того, в перспективе рассматривается возможность использования технологий машинного обучения в анализе результатов тестирования для выявления скрытых закономерностей в данных и предоставления HR-специалистам более глубокой аналитики, включающей прогнозирование поведения сотрудников на основе их когнитивных и эмоциональных характеристик. Применение искусственного интеллекта может стать важным инструментом в управлении талантами и повышении эффективности работы команды.

В итоге разработанная система не только полностью удовлетворяет функциональным требованиям, но и имеет

значительный потенциал для дальнейшего усовершенствования и применения в HR-отделах крупных компаний.

Список литературы

1. Программно-информационная система тестирования эмоциональной сферы человека / Р. А. Томакова, Д. К. Реутов, Е. А. Астапов [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 1. С. 23–38. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-23-38>
2. Лобанова Т. Н., Захарова Л. Н., Леонова И. С. Психология в управлении персоналом: новый баланс // Организационная психология. 2022. Т. 12, № 1. С. 248–269.
3. Шипилова Е. И., Приз Т. Ф. Психологические методы управления персоналом // Личность в меняющемся мире: здоровье, адаптация, развитие. 2015. № 3(10). С. 116–125.
4. Ахо А. В., Ульман Д. Д., Хопкрофт Д. Э. Структуры данных и алгоритмы: [пер. с англ.]. СПб.: Диалектика, 2019. 400 с.
5. Head First. Паттерны проектирования / Э. Фримен, Э. Робсон, К. Сьерра, Б. Бейтса. М.: Питер, 2021. 640 с.
6. Осипов Д. Л. Технологии проектирования баз данных. М.: ДМК Пресс, 2019. 498 с.
7. Худик В. А. Экспериментальное изучение простых сенсомоторных реакций с помощью таблиц Шульте // Коррекционно-педагогическое образование. 2018. № 1(13). С. 86–91.
8. Визерский А. В., Николаева Ю. С. Таблица Горботова-Шульге как средство оценки переключения и распределения внимания // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. Т. 3, № 4(14). С. 757–759.
9. Психофизиологические аспекты тестирования студентов на основе применения комплекса BioMouse / Д. А. Раевский, Н. Г. Пучкова, Л. А. Сергеева, С. Д. Старостин // Ученые записки университета им. П. Ф. Лесгата. 2023. № 6(220). С. 543–548. <https://doi.org/10.34835/issn.2308-1961.2023.06.p543-548>
10. Эббингауз Г. Об объясняющей и описательной психологии // Логос. 2014. № 4(100). С. 147–186.
11. Мартин Р. Чистая архитектура. Искусство разработки программного обеспечения / пер. с англ. А. Кисилева. СПб.: Питер, 2025. 352 с.
12. Руководство для прогрессивных матриц Равена и словарных шкал: перевод с английского издания 2000 года: (включая параллельные и плюс версии): с нормами для

СПМ Плюс и формулами для вычисления изменений в баллах / Д. Равен, Дж. Равен, Дж. К. Равен, Дж. Корт. Изд. 2-е, стер. М.: Когито-Центр, 2012. 143 с.

13. Вучичевич Б. Ответы младших школьников на задания стандартных прогрессивных матриц Равена: логический и психологический анализ // Теоретическая и экспериментальная психология. 2023. Т. 16, № 1. С. 63–79. <https://doi.org/10.24412/TER-23-04>

14. Амира-Шохнек М. И., Шохнек А. В., Гомаюнова Ю. С. Детерминанты психологической готовности и стрессоустойчивости личности в организации предпринимательской деятельности // Экономика и предпринимательство. 2022. № 11(148). С. 984–987. <https://doi.org/10.34925/EIP.2022.148.11.192>. EDN НАУФСК

15. Токарева Ю. А., Коваленко Т. К. Связь стрессоустойчивости с нервно-психической устойчивостью личности руководителя // Европейский журнал социальных наук. 2016. № 2. С. 491–495.

16. Яценко В. В., Яценко Р. Д. Эффективное управление командой и организация коммуникаций проекта // Дискуссия. 2017. № 6(80). С. 64–68.

17. Карпова Е. А., Воронина М. Ф. Перспективы формирования и развития групп: ролевой подход // Социология и право. 2016. № 2(32). С. 14–23.

18. Дженифер Т., Чарли Б., Эйн В. Разработка интерфейсов. Паттерны проектирования. СПб.: Питер, 2022. 560 с.

19. Латушкина Т. С., Яковлев В. А., Майорова И. А. Использование и применение javascript-фреймворков (react, angular, vue.js) для разработки web-приложений // Экономика и предпринимательство. 2023. № 9(158). С. 1374–1376. <https://doi.org/10.34925/EIP.2023.158.09.267>

20. Минкин В. А. Сравнительное психофизиологическое тестирование с предъявлением аудио- и видеоинформации // Безопасность жизнедеятельности. 2016. № 10(190). С. 25–33.

21. Чаплыгин А. А. Моделирование интерпретатора функционального языка программирования с возможностями метапрограммирования // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. № 14(2). С. 181–193. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-181-193>

22. Проектирование информационных систем управления документооборотом научно-образовательных учреждений: монография / М. Н. Краснянский, С. В. Карпушкин, А. В. Остроух [и др.]. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2015. 216 с.

References

1. Tomakova R.A., Reutov D.K., Astapov E.A., et al. Software and information system for testing the emotional sphere of a person. *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. 2023;13(1):23–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-23-38>

2. Lobanova T.N., Zakharova L.N., Leonova I.S. Psychology in personnel management: a new balance. *Organizatsionnaya psichologiya = Organizational Psychology.* 2022;12(1):248–269. (In Russ.)

3. Shipilova E.I., Priz T.F. Psychological methods of personnel management. *Lichnost' v menyayushchemya mire: zdorov'e, adaptatsiya, razvitiye = Personality in a Changing World: Health, Adaptation, Development.* 2015;(3):116–125. (In Russ.)

4. Aho A.V., Ulman D.D., Hopcroft D.E. Data structures and algorithms. Saint Petersburg: Dialektika; 2019. 400 p. (In Russ.)

5. Freeman E., Robson E., Sierra K., Bates B. Head First. Design patterns. Moscow: Piter; 2021. 640 p. (In Russ.)

6. Osipov D.L. Database design technologies. Moscow: DMK Press; 2019. 498 p. (In Russ.)

7. Khudik V.A. Experimental study of simple sensorimotor reactions using Schulte tables. *Korrektionno-pedagogicheskoe obrazovanie = Correctional Pedagogical Education.* 2018;(1):86–91. (In Russ.)

8. Vizersky A.V., Nikolaeva Yu.S. The Gorbottov-Shulge table as a means of assessing switching and attention distribution. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki = Actual Problems of Aviation and Cosmonautics.* 2018;3(4):757–759. (In Russ.)

9. Rayevsky D.A., Puchkova N.G., Sergeeva L.A., Starostin S.D. Psychophysiological aspects of testing students based on the application of the BioMouse complex. *Uchenye zapiski universiteta im. P. F. Lesgafta = Scientific Notes of the P.F. Lesgaft University.* 2023;(6):543–548. (In Russ.) <https://doi.org/10.34835/issn.2308-1961.2023.06.p543-548>

10. Ebbinghaus G. On explanatory and descriptive psychology. *Logos = Logos.* 2014;(4):147–186. (In Russ.)

11. Martin R. Pure architecture. The art of software engineering. Saint Petersburg: Peter; 2025. 352 p. (In Russ.)

12. Raven D., Raven J., Raven J. K., Court J. Handbook for Progressive Raven Matrices and Vocabulary Scales: translated from the English edition of 2000: (including parallel and plus versions): with norms for SPM Plus and formulas for calculating changes in scores. 2nd ed. Moscow: Kogito-Tsentr; 2012. 143 p. (In Russ.)

13. Vucicevich B. Answers of younger schoolchildren to the tasks of standard progressive Raven matrices: logical and psychological analysis. *Teoreticheskaya i eksperimental'naya psichologiya = Theoretical and Experimental Psychology.* 2023;16(1):63–79. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/TEP-23-04>

14. Amira-Shokhneh M.I., Shokhneh A.V., Gomayunova Yu.S. Determinants of psychological readiness and stress tolerance of personality in the organization of entrepreneurial activity. *Ekonomika i predprinimatel'stvo = Economics and Entrepreneurship*. 2022;(11):984–987. (In Russ.) <https://doi.org/10.34925/EIP.2022.148.11.192>. EDN HAYFCK
15. Tokareva Yu.A., Kovalenko T.K. The relationship of stress tolerance with the neuro-psychic stability of the personality of the leader. *Europeiskii zhurnal sotsial'nykh nauk = European Journal of Social Sciences*. 2016;(2):491–495. (In Russ.)
16. Yatsenko V.V., Yatsenko R.D. Effective team management and project communications organization. *Diskussiya = Discussion*. 2017;(6):64–68. (In Russ.)
17. Karpova E.A., Voronina M.F. Prospects for the formation and development of groups: a role-based approach. *Sotsiologiya i pravo = Sociology and Law*. 2016;(2):14–23. (In Russ.)
18. Jennifer T., Charlie B., Einn V. Interface development. Design patterns. Saint Petersburg: Peter; 2022. 560 p. (In Russ.)
19. Latushkina T.S., Yakovlev V.A., Mayorova I.A. The use and application of javascript frameworks (react, angular, vue.js) for web application development. *Ekonomika i predprinimatel'stvo = Economics and Entrepreneurship*. 2023;(9):1374–1376. (In Russ.) <https://doi.org/10.34925/EIP.2023.158.09.267>
20. Minkin V.A. Comparative psychophysiological testing with the introduction of audio and video information. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = Life Safety*. 2016;(10):25–33. (In Russ.)
21. Chaplygin A.A. Modeling of a functional programming language interpreter with metaprogramming capabilities. *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):181–193. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-2-181-193>
22. Krasnyansky M.N., Karpushkin S.V., Ostroukh A.V., et al. Designing information systems for document management in scientific and educational institutions. Tambov: Tambovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet; 2015. 216 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

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, Author ID: 739221

Rimma A. Tomakova, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of 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, Author ID: 739221

Малышев Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alta76@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-99938-3456

Alexander V. Malyshev, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: alta76@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-99938-3456

Быков Андрей Владимирович, магистрант кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, e-mail: qazwsx300@mail.ru

Andrey V. Bykov, Undergraduate of the Department of Software Engineering, Southwest State University, e-mail: qazwsx300@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-40-49>

УДК 616.21

Роль распределённых вычислительных систем в современных технологических экосистемах

С. А. Нестерович¹✉, А. Н. Брежнева²

¹ Российского государственного социального университета
ул. Вильгельма Пика, д. 4/1, г. Москва 129226, Российская Федерация

² Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова
Стремянный пер., д. 36, г. Москва 117997, Российская Федерация

✉ e-mail: NesterovichSA@rgsu.net

Резюме

Цель исследования заключается в анализе роли распределённых вычислительных систем в формировании и развитии ключевых направлений современной цифровой инфраструктуры, а также в выявлении перспектив и вызовов, связанных с их интеграцией в технологические экосистемы.

Методы. Использованы статистические данные и аналитические отчёты ведущих источников (*Statista, DB-Engines, MarketsandMarkets, Cambridge Centre for Alternative Finance*), а также технические спецификации и практические кейсы использования фреймворков и систем (*Apache Hadoop, Cassandra, IBM Summit*). Методологически применён сравнительный анализ, обобщение практических примеров и прогнозирование на основе современных технологических трендов.

Результаты. Подтверждено, что РВС являются фундаментом для облачных вычислений, обработки больших данных, Интернета вещей, высокопроизводительных вычислений и технологий блокчейн. Облачные платформы AWS, Microsoft Azure и Google Cloud используют распределённые архитектуры для масштабируемости и отказоустойчивости. В Big Data ключевую роль играют фреймворки Apache Hadoop и Spark, позволяющие анализировать огромные объёмы данных. Распределённые базы данных, такие как Cassandra и MongoDB, обеспечивают высокую производительность и отказоустойчивость. В IoT РВС поддерживают обработку данных на уровне edge и fog computing, минимизируя задержки. HPC-системы, например суперкомпьютер Summit, демонстрируют вычислительную мощь распределённых систем. Блокчейн и криптовалюты используют распределённые узлы для безопасности и децентрализации. Выделены ключевые тренды: интеграция с ИИ, рост edge/fog computing, квантовые распределённые архитектуры, доверенные вычисления и автоматизация управления. Среди вызовов – вопросы безопасности, сложности управления, масштабируемости, зависимости от сетевой инфраструктуры и нормативного регулирования.

Выводы. РВС играют определяющую роль в цифровой трансформации. Их применение позволяет обеспечить отказоустойчивость, масштабируемость и высокую производительность ИТ-сервисов. Будущее РВС связано с внедрением ИИ, автоматизацией управления и адаптацией к новым вычислительным моделям. Для устойчивого развития РВС необходимы решения в области безопасности, нормативного регулирования и оптимизации сетевой инфраструктуры.

Ключевые слова: распределённые вычислительные системы; облачные технологии; большие данные; IoT; блокчейн; HPC; edge computing.

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

© Нестерович С. А., Брежнева А. Н., 2025

Для цитирования: Нестерович С. А., Брежнева А. Н. Роль распределённых вычислительных систем в современных технологических экосистемах // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 3. С. 40–49. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-40-49>

Поступила в редакцию 07.07.2025

Подписана в печать 05.08.2025

Опубликована 30.09.2025

The role of distributed computing systems in modern technological ecosystems

Sergey A. Nesterovich¹✉, Aleksandra N. Brezhneva²

¹ Russian State Social University
4/1 Wilhelm Peak Str., Moscow 129226, Russian Federation

² Plekhanov Russian University of Economics
36 Stremskaya side-street, Moscow 117997, Russian Federation

✉ e-mail: NesterovichSA@rgsu.net

Abstract

The purpose of research is to analyze the role and significance of distributed computing systems (DCS) in shaping and developing key areas of modern digital infrastructure, as well as to identify the prospects and challenges related to their further integration into technological ecosystems.

Methods. The materials used include statistical data and analytical reports from authoritative sources (Statista, DB-Engines, MarketsandMarkets, etc.), as well as technical specifications of frameworks and systems (Apache Hadoop, Cassandra, IBM Summit, etc.). The methodology involves comparative analysis, generalization of practical case studies, and forecasting based on technological development trends.

Results. It has been established that DCS form the foundation of cloud computing, Big Data, IoT, high-performance computing (HPC), and blockchain technologies. Key technological trends have been identified: integration with artificial intelligence, the growth of edge and fog computing, the development of quantum distributed architectures, and trusted computing. Noted risks include management complexity, cybersecurity vulnerabilities, scalability challenges, and legal issues.

Conclusion. Distributed computing systems play a crucial role in digital transformation. Their implementation ensures fault tolerance, scalability, and high performance of IT services. The future of DCS lies in AI integration, automated management, and adaptation to emerging computing models. Sustainable development of DCS requires advances in security, regulatory frameworks, and optimization of network infrastructure.

Keywords: distributed computing systems; cloud technologies; big data; IoT; blockchain; HPC; edge computing.

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

For citation: Nesterovich S.A., Brezhneva A.N. The role of distributed computing systems in modern technological ecosystems. *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(3):40–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-40-49>

Received 07.07.2025

Accepted 05.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

Современные информационные технологии стремительно развиваются в условиях глобальной цифровизации, порождая всё более сложные и масштабные системы обработки данных. В этих условиях особое значение приобретают РВС, которые позволяют эффективно управлять большими объёмами информации, обеспечивать отказоустойчивость, масштабируемость и высокую производительность [1]. РВС лежат в основе таких ключевых направлений, как облачные вычисления, анализ больших данных, Интернет вещей (IoT), высокопроизводительные вычисления, а также блокчейн и криптовалютные платформы [2]. Настоящая статья посвящена анализу роли распределённых вычислительных систем в формировании технологических экосистем, их текущим возможностям, перспективам развития и возникающим вызовам.

РВС играют центральную роль в инфраструктуре современных информационных технологий, обеспечивая функционирование ключевых сервисов, таких как облачные вычисления, обработка больших данных, высокопроизводительные вычисления и IoT. Эти системы позволяют эффективно обрабатывать, хранить и передавать большие объёмы данных, а также обеспечивать масштабируемость, отказоустойчивость и высокую производительность. РВС влияют на различные области и отрасли, а также какие статистические данные подтверждают

их важность. Тем не менее остаются некоторые вопросы, связанные с тенденциями развития в РВС в современных технологических экосистемах.

Материалы и методы

В исследовании использован метод анализа вторичных данных: статистических отчётов (Statista, Market Research Future, Cambridge Centre for Alternative Finance и др.), технической документации (Apache, AWS, Microsoft Azure и др.), а также открытых источников и публикаций, отражающих текущее состояние и тренды в области распределённых вычислительных систем. Основу анализа составляют реальные примеры внедрения РВС в различных технологических областях.

Распределённые вычисления в облачных сервисах

Облачные вычисления являются одним из ярких примеров использования распределённых вычислительных систем. Согласно данным Statista [3], мировой рынок облачных услуг в 2023 г. оценивается в 597 млрд долл. США, а по прогнозам к 2027 г. эта цифра возрастёт до 1,2 трлн долл. Ключевыми игроками на этом рынке являются Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure [4] и Google Cloud Platform [5], каждый из которых использует распределённые вычислительные архитектуры для обеспечения масштабируемости и отказоустойчивости своих сервисов [6].

Например, AWS [5] в 2022 г. контролировала более 30% мирового облачного рынка, что подчёркивает важность распределённых вычислений для обеспечения работы таких крупных облачных инфраструктур.

Компании, такие как Netflix [7], Dropbox и Airbnb, используют облачные решения для обработки больших объёмов данных и обеспечения доступности своих сервисов на глобальном уровне. Это подтверждает роль РВС как основы для облачных вычислений, где обработка данных и их хранение требуют распределённых систем.

Обработка больших данных

Обработка больших данных (Big Data) – ещё одна ключевая область, где распределённые вычислительные системы играют важную роль. Рынок Big Data продолжает быстро расти: по данным Market Research Future, ожидаемый рост этого рынка с 2023 по 2030 гг. составит 18,6% в год, и к 2030 г. его объём достигнет 401,9 млрд долл.

Apache Hadoop [5] и Apache Spark – это два широко используемых фреймворка, которые обеспечивают распределённую обработку данных в реальном времени. Эти технологии позволяют анализировать огромные массивы данных, которые традиционные централизованные системы обработать не могут.

Примером успешного использования распределённых вычислений в области Big Data является Netflix [7], который обрабатывает более 2 млрд ч видео каждый месяц. Это позволяет компании

анализировать предпочтения пользователей и предоставлять персонализированные рекомендации.

Распределённые базы данных

Распределённые базы данных, такие как Cassandra [8], MongoDB [9] и CouchDB, активно используются для хранения и обработки данных в реальном времени. По данным DB-Engines [10], базы данных, использующие распределённые архитектуры, занимают более 50% рынка в области баз данных.

Например, Apache Cassandra используется такими компаниями, как Netflix, Spotify и Instagram, для обеспечения отказоустойчивости и масштабируемости своих сервисов. Instagram обрабатывает до 100 млрд запросов в день, что демонстрирует важность РВС для высоконагруженных приложений.

В 2019 г., согласно DataStax, Cassandra обработала более 5 млрд операций в секунду по всему миру, что подтверждает роль распределённых систем в обеспечении высокой производительности баз данных.

Интернет вещей (IoT)

РВС также являются неотъемлемой частью экосистемы IoT. Согласно Statista [6], в 2023 г. количество подключённых устройств IoT в мире составляет 14 млрд, и это число будет расти с темпом 11% в год до 2030 г. В этой области распределённые вычисления помогают эффективно обрабатывать данные от миллиардов устройств.

Edge Computing [1], который является частью инфраструктуры IoT, использует распределённые вычисления для обработки данных на местах, минимизируя задержки и обеспечивая быструю реакцию системы. Например, умные устройства в домах или на фабриках используют РВС для анализа и обработки информации в реальном времени.

Распределённые системы также обеспечивают обработку и анализ данных от таких устройств, как умные терmostаты, системы видеонаблюдения и промышленное оборудование, что важно для автоматизации и повышения эффективности различных процессов.

Высокопроизводительные вычисления

Высокопроизводительные вычисления используются для решения сложных научных, инженерных и финансовых задач. В этой области распределённые системы обеспечивают необходимые вычислительные мощности для работы суперкомпьютеров [11]. Согласно MarketsandMarkets [12], рынок высокопроизводительные вычисления будет расти на 8,4% в год, и к 2028 г. его объём достигнет 48,2 млрд долл.

Например, суперкомпьютер Summit, разработанный в IBM, является одним из самых мощных вычислительных систем в мире, использующих распределённые архитектуры для моделирования сложных физических процессов. Summit способен выполнять более 200 петафлопс вычислений в секунду, что подтверждает

ключевую роль РВС в научных исследованиях.

Высокопроизводительные вычисления активно используются для прогнозирования погоды, генетических исследований и разработки новых лекарств, где требуется обработка огромных объёмов данных.

Блокчейн и криптовалюты

Технологии блокчейн и криптовалюты также основываются на распределённых вычислениях для обеспечения безопасности и прозрачности транзакций. Согласно Cambridge Centre for Alternative Finance [13], в 2023 г. вычислительная мощность сети Bitcoin составляет более 150 эксфлопс (операций в секунду), что подчеркивает масштаб и важность распределённых вычислений для поддержания работы таких сетей.

Bitcoin и другие криптовалюты используют распределённые узлы для подтверждения транзакций и обеспечения безопасности системы. Это позволяет создавать децентрализованные финансовые системы, в которых нет необходимости в центральных посредниках.

С развитием цифровых технологий и глобальной цифровизации распределённые вычислительные системы будут продолжать демонстрировать устойчивый рост и развитие.

В ближайшем будущем можно ожидать следующие ключевые тенденции:

1. Интеграция с искусственным интеллектом и машинным обучением РВС всё чаще применяются для распределённого обучения нейронных

сетей и ускорения анализа больших данных. Технологии, такие как Federated Learning [14] (федеративное обучение), позволяют обучать модели ИИ непосредственно на пользовательских устройствах без необходимости передачи данных в централизованные центры.

2. Рост Edge Computing [1] и Fog Computing [15]. Устройства IoT [3] создают огромные объёмы данных, которые требуют обработки вблизи источника. Рост edge- и fog-инфраструктуры приведёт к ещё более широкому распространению распределённых систем в промышленности, здравоохранении, транспорте и умных городах.

3. Квантовые вычисления в распределённых архитектурах. С развитием квантовых технологий распределённые вычисления могут интегрировать квантовые модули [16], что обеспечит вычислительную мощность, недостижимую для классических систем.

4. Безопасные и доверенные вычисления (confidential computing [17]). В условиях растущего внимания к конфиденциальности распределённые вычислительные системы будут всё активнее использовать аппаратные механизмы защиты данных, позволяя безопасно обрабатывать данные даже в недоверенной среде.

5. Автоматизация управления и самооптимизация систем. Благодаря инструментам оркестрации и искусственному интеллекту [18], РВС смогут автоматически масштабироваться, распределять

нагрузки и устранять сбои без вмешательства оператора.

Несмотря на все достоинства РВС, остаются потенциальные уязвимости и вызовы [19]:

1) безопасность и кибератаки. Чем больше узлов в системе, тем выше вероятность уязвимостей. Распределённые архитектуры остаются мишениями для атак типа DDoS, атак на консенсус в блокчейне, компрометации отдельных узлов и перехвата данных [20];

2) сложность управления и отладки. Координация множества компонентов требует высокой квалификации и надёжных инструментов мониторинга. Ошибки конфигурации, сетевые сбои и проблемы с синхронизацией времени могут вызывать трудновыявляемые ошибки [21];

3) проблемы с масштабируемостью при росте нагрузки. Хотя РВС проектируются с прицелом на масштабируемость, чрезмерный рост может вызывать узкие места в сети, ограничение пропускной способности и рост задержек [22];

4) зависимость от сетевой инфраструктуры. Эффективность РВС напрямую зависит от стабильной и быстрой сети. Потери пакетов, высокая латентность или отключение сети могут привести к снижению производительности или недоступности сервисов [23];

5) вопросы нормативного регулирования и конфиденциальности данных [24]. При распределении вычислений по разным странам и юрисдикциям могут

возникать конфликты по поводу хранения, обработки и передачи персональных данных [25].

Результаты и их обсуждение

Анализ показал, что распределённые вычислительные системы являются ключевыми технологиями цифровой экономики. Они применяются в высоко-нагруженных облачных платформах, обработке больших данных, системах IoT, суперкомпьютерах и блокчейн-инфраструктуре. Представленные статистические данные (объёмы рынков, примеры крупных компаний, уровень вычислительной мощности) подтверждают расущее значение РВС. Были также выявлены перспективные направления развития (интеграция с ИИ, edge/fog computing, квантовые вычисления) и актуальные вызовы: вопросы безопасности, управления, масштабируемости, сетевой зависимости и правового регулирования.

Выводы

РВС являются основой для множества современных технологических решений. Они играют ключевую роль в

облачных вычислениях, обработке больших данных, функционировании распределённых баз данных, Интернете вещей, высокопроизводительных вычислениях и блокчейне. Статистические данные подтверждают, что роль РВС в современных технологиях продолжает расти: рынок облачных вычислений и Big Data увеличивается с каждым годом, компании используют РВС для масштабирования своих сервисов, а НРС-системы позволяют решать задачи, которые невозможно выполнить с помощью традиционных вычислительных подходов.

Распределённые вычислительные системы обеспечивают масштабируемость, отказоустойчивость, производительность и надёжность современных информационных технологий, играя незаменимую роль в развитии глобальной цифровой инфраструктуры. Будущее РВС связано с их адаптацией к новым требованиям: более интеллектуальной, автономной и безопасной работе. При условии своевременного решения вышеуказанных проблем РВС будут и дальше оставаться краеугольным камнем высокотехнологичных экосистем XXI века.

Список литературы

1. Khan M. S., Lee H. J. Edge computing in IoT: Architecture and security // J. of Network and Computer Applications. 2024. Vol. 226. P. 103884.
2. Al-Shareeda M. A., Hassan R., Ismail M. Review of edge computing for the Internet of Things // J. of Sensor Network & Data Communications. 2024. Vol. 4(1). P. 1–11.
3. Connected devices in the IoT 2019–2030. 2024 // Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/1101442> (дата обращения: 08.06.2025).
4. Distributed architecture design. Microsoft Learn, 2023 // Microsoft Azure. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/architecture> (дата обращения: 08.06.2025).

5. Distributed systems on Google Cloud. Google Cloud Docs, 2023 // Google Cloud. URL: <https://cloud.google.com/architecture> (дата обращения: 08.06.2025).
6. Global cloud services market 2023–2027. 2024 // Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/1060118> (дата обращения: 08.06.2025).
7. Netflix tech stack and distributed analytics. TechCrunch Reports, 2023 // TechCrunch. URL: <https://techcrunch.com/netflix-distributed> (дата обращения: 08.06.2025).
8. Apache Cassandra™ Performance. 2023 // DataStax. URL: <https://www.datastax.com/resources/benchmark> (дата обращения: 08.06.2025).
9. Distributed database architecture. MongoDB Docs, 2023 // MongoDB. URL: <https://www.mongodb.com/docs> (дата обращения: 08.06.2025).
10. Ranking of Database Management Systems. 2024 // DB-Engines. URL: <https://db-engines.com/en/ranking> (дата обращения: 08.06.2025).
11. High Performance Computing Market – Forecast to 2028. 2023 // MarketsandMarkets. URL: <https://www.marketsandmarkets.com> (дата обращения: 08.06.2025).
12. CBIG Data Market Analysis 2023–2030. 2024 // MarketsandMarkets. URL: <https://www.marketsandmarkets.com> (дата обращения: 08.06.2025).
13. Cambridge Centre for Alternative Finance // 4th Global Cryptoasset Benchmarking Study. Cambridge University, 2023. URL: <https://ccaf.io/publications> (дата обращения: 08.06.2025).
14. Jiao L., Zhao J., Liu Z. Federated Learning meets Edge Computing: Opportunities and Challenges // IEEE Internet of Things Journal. 2023. Vol. 10(2). P. 903–918.
15. Velasquez C. J., Rehman A. Trends in Fog Computing: Recent advances // IEEE Access. 2024. Vol. 12. P. 33212–33225.
16. Zhang Y., Wang L. Quantum computing in distributed systems // Nature Reviews Computer Science. 2023. Vol. 1(4). P. 78–90.
17. Confidential computing: technologies and use cases. Intel White Paper, 2023 // Intel. URL: <https://www.intel.com/confidential-computing> (дата обращения: 08.06.2025).
18. Trends in Distributed AI and Federated Learning. OpenAI Research Blog, 2023 // OpenAI. URL: <https://openai.com/research> (дата обращения: 08.06.2025).
19. White D. Designing scalable distributed systems // ACM Queue. 2023. Vol. 21(3). P. 55–70.
20. Harish V., Sridevi R. Performance analysis of public and private blockchains // Proc. of ICNSBT 2023. Singapore: Springer, 2024. Vol. 735. P. 233–244.
21. IBM Summit Supercomputer Overview. IBM Research, 2023 // IBM. URL: <https://www.research.ibm.com/summit> (дата обращения: 08.06.2025).
22. Worldwide Edge Spending Guide. 2024 // IDC. URL: <https://www.idc.com> (дата обращения: 08.06.2025).
23. Otte P., de Vos M. Distributed systems: from blockchain to IoT // Future Generation Computer Systems. 2023. Vol. 141. P. 1–15.

24. Distributed computing architectures in modern IT. Red Hat White Paper, 2023 // Red Hat. URL: <https://www.redhat.com/en/resources> (дата обращения: 08.06.2025).
25. Syed A. A., Gani A., Buyya R. A review on distributed systems for big data // Information Systems Frontiers. 2023. Vol. 25. P. 99–121.

References

1. Khan M.S., Lee H.J. Edge computing in IoT: Architecture and security. *J. of Network and Computer Applications*. 2024;226:103884.
2. Al-Shareeda M.A., Hassan R., Ismail M. Review of edge computing for the Internet of Things. *J. of Sensor Network & Data Communications*. 2024;4(1):1–11.
3. Connected devices in the IoT 2019–2030. 2024. Statista. Available at: <https://www.statista.com/statistics/1101442> (accessed 08.06.2025).
4. Distributed architecture design. Microsoft Learn, 2023. Microsoft Azure. Available at: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/architecture> (accessed 08.06.2025).
5. Distributed systems on Google Cloud. Google Cloud Docs, 2023. Google Cloud. Available at: <https://cloud.google.com/architecture> (accessed 08.06.2025).
6. Global cloud services market 2023–2027. 2024. Statista. Available at: <https://www.statista.com/statistics/1060118> (accessed 08.06.2025).
7. Netflix tech stack and distributed analytics. TechCrunch Reports, 2023. TechCrunch. Available at: <https://techcrunch.com/netflix-distributed> (accessed 08.06.2025).
8. Apache Cassandra™ Performance. 2023. DataStax. Available at: <https://www.datastax.com/resources/benchmark> (accessed 08.06.2025).
9. Distributed database architecture. MongoDB Docs, 2023. MongoDB. Available at: <https://www.mongodb.com/docs> (accessed 08.06.2025).
10. Ranking of Database Management Systems. 2024. DB-Engines. URL: <https://db-engines.com/en/ranking> (accessed 08.06.2025).
11. High Performance Computing Market – Forecast to 2028. 2023. MarketsandMarkets. Available at: <https://www.marketsandmarkets.com> (accessed 08.06.2025).
12. CBIG Data Market Analysis 2023–2030. 2024. MarketsandMarkets. Available at: <https://www.marketsandmarkets.com> (accessed 08.06.2025).
13. Cambridge Centre for Alternative Finance. 4th Global Cryptoasset Benchmarking Study. Cambridge University, 2023. Available at: <https://ccaf.io/publications> (accessed 08.06.2025).
14. Jiao L., Zhao J., Liu Z. Federated Learning meets Edge Computing: Opportunities and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*. 2023;10(2):903–918.
15. Velasquez C.J., Rehman A. Trends in Fog Computing: Recent advances. *IEEE Access*. 2024;12:33212–33225.

16. Zhang Y., Wang L. Quantum computing in distributed systems. *Nature Reviews Computer Science*. 2023;1(4):78–90.
17. Confidential computing: technologies and use cases. Intel White Paper, 2023. Intel. Available at: <https://www.intel.com/confidential-computing> (accessed 08.06.2025).
18. Trends in Distributed AI and Federated Learning. OpenAI Research Blog, 2023. OpenAI. Available at: <https://openai.com/research> (accessed 08.06.2025).
19. White D. Designing scalable distributed systems. *ACM Queue*. 2023;21(3):55–70.
20. Harish V., Sridevi R. Performance analysis of public and private blockchains. In: *Proc. of ICNSBT 2023*. Vol. 735. Singapore: Springer; 2024. P. 233–244.
21. IBM Summit Supercomputer Overview. IBM Research, 2023. IBM. Available at: <https://www.research.ibm.com/summit> (accessed 08.06.2025).
22. Worldwide Edge Spending Guide. 2024. IDC. Available at: <https://www.idc.com> (accessed 08.06.2025).
23. Otte P., de Vos M. Distributed systems: from blockchain to IoT. *Future Generation Computer Systems*. 2023;141:1–15.
24. Distributed computing architectures in modern IT. Red Hat White Paper, 2023. Red Hat. Available at: <https://www.redhat.com/en/resources> (accessed 08.06.2025).
25. Syed A.A., Gani A., Buyya R. A review on distributed systems for big data. *Information Systems Frontiers*. 2023;25:99–121.

Информация об авторах / Information about the Authors

Нестерович Сергей Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационных
технологий, искусственного интеллекта
и общественно-социальных технологий
цифрового общества, Российский
государственный социальный университет,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: NesterovichSA@rgsu.net,
ORCID: 0000-0003-1360-149X

Sergey A. Nesterovich, Candidate of Sciences
(Engineering), Associate Professor, Associate
Professor of the Department of Information
Technology, Artificial Intelligence
and Socio-Social Technologies
of the Digital Society, Russian State
Social University, Moscow, Russian Federation,
e-mail: NesterovichSA@rgsu.net,
ORCID: 0000-0003-1360-149X

Брежнева Александра Николаевна,
кандидат технических наук, доцент кафедры
информатики, Российский экономический
университет имени Г. В. Плеханова,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: brezhneva.an@rea.ru,
ORCID: 0000-0001-5226-329X

Aleksandra N. Brezhneva, Candidate
of Sciences (Engineering), Associate Professor
of the Department of Informatics, Plekhanov
Russian University of Economics,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: brezhneva.an@rea.ru,
ORCID: 0000-0001-5226-329X

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-50-65>

УДК 004.031.42+616.5-006

Интеллектуальная система поддержки принятия решений врача в диагностике новообразований кожи на основе анализа дерматоскопических изображений

Е. С. Козачок¹✉, С. С. Серегин², А. В. Козачок¹,
К. В. Елецкий¹, О. И. Самоваров¹

¹ Институт системного программирования им. В. П. Иванникова РАН
ул. Александра Солженицына, д. 25, г. Москва 109004, Российская Федерация

² Бюджетное учреждение здравоохранения Орловской области «Орловский онкологический диспансер»
Ипподромный переулок, д. 2, г. Орел 302020, Российская Федерация

✉ e-mail: e.kozachok@ispras.ru

Резюме

Цель исследований – разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений врача, основанная на автоматизированном анализе дерматоскопических изображений с использованием алгоритмов машинного обучения, предназначенном для ранней диагностики и выявления злокачественных кожных новообразований. Разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решения врача как для профильных специалистов, так и для врачей общей практики и среднего медицинского персонала, осуществляющих первичную обследование пациентов с новообразованиями кожи, является актуальным направлением исследований.

Методы. Предложена архитектура интеллектуальной системы поддержки принятия решений врача, основанной на анализе дерматоскопических изображений. Система реализована в виде клиент-серверного веб-приложения. В качестве клиента выступает веб-приложение, реализующее функционал личного кабинета врача. При этом сервером является облачная инфраструктура, осуществляющая сбор, хранение и анализ дерматоскопических изображений, а также формирование отчета о нозологической группе кожного образования. В процессе анализа дерматоскопических изображений применяются методы машинного обучения, основанные на использовании нейронных сетевых с архитектурой «виртуальный трансформер» и сформированного набора дерматоскопических изображений.

Результаты. Практически реализована и апробирована в клинических условиях разработанная интеллектуальная система поддержки принятия решений врача, характеризующаяся значениями точности, превышающими 93% для показателя Accuracy и 89% – F-мера на этапе обучения, более 89% (показателя Accuracy) – в процессе проведения медицинских осмотров. Полученные значения экспериментальных оценок позволили сформировать рекомендации по интеграции разработанной интеллектуальной системы поддержки принятия решений врача в рабочие процессы медицинских учреждений.

Заключение. Разработанная система обеспечивает автоматизированный анализ изображений, структурирование метаданных, визуализацию предсказаний моделей и возможность экспертной разметки, может быть применена не только профильными врачами при проведении медицинских осмотров и исследований, но и врачами общей практики и средним медицинским персоналом при проведении скрининговых обследований, выездных профилактических приемов и диспансеризации.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений врача; дерматоскопические изображения; кожные новообразования; машинное обучение.

© Козачок Е. С., Серегин С. С., Козачок А. В., Елецкий К. В., Самоваров О. И., 2025

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление,
вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025;15(3):50–65

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

Для цитирования: Интеллектуальная система поддержки принятия решений врача в диагностике новообразований кожи на основе анализа дерматоскопических изображений / Е. С. Козачок, С. С. Серегин, А. В. Козачок, К. В. Елецкий, О. И. Самоваров // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 3. С. 50–65. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-50-65>

Поступила в редакцию 06.07.2025

Подписана в печать 04.08.2025

Опубликована 30.09.2025

Intelligent system for supporting physician decision-making in skin neoplasm diagnostics based on dermatoscopic image analysis

Elena S. Kozachok¹✉, Sergey S. Seregin², Alexander V. Kozachok¹,
Kirill V. Eleckij¹, Oleg I. Samovarov¹

¹ Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences
25 Alexander Solzhenitsyn Str., Moscow 109004, Russian Federation

² Budgetary Healthcare Institution of the Oryol Region "Oryol Oncology Dispensary"
2 Ippodromnyi side-street, Oryol 302020, Russian Federation

✉ e-mail: e.kozachok@ispras.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop an intelligent decision support system for physicians based on automated analysis of dermatoscopic images using machine learning algorithms, designed for early diagnostics and detection of malignant skin neoplasms. The development of an intelligent system for supporting physicians' decision making for both specialized specialists and general practitioners and nursing staff performing primary examination of patients with skin neoplasms is a research relevant area.

Methods. The intelligent system architecture for supporting doctors' decision-making based on the analysis of dermatoscopic images is proposed. The configuration used is a network approach based on the client-server mode. The client is a web application implementing the doctor's personal account functionality. This server hosts a cloud infrastructure that collects, stores and analyzes dermatoscopic images, and also maintains a report on the nosological group of skin lesions. In the analyzing process dermatoscopic images, machine learning methods are used based on the neural network's usage with the virtual transformer architecture and a formed set of dermatoscopic images.

Results. The developed intelligent system for supporting physician decision-making has been practically implemented and tested in clinical conditions. It is characterized by accuracy values exceeding 93% for the Accuracy indicator and 89% – F-measure at the training stage and more than 89% (Accuracy indicator) during medical examinations. The obtained values of experimental assessments made it possible to formulate recommendations for integrating the developed intelligent system for supporting physician decision-making into the work processes of medical institutions.

Conclusion. The developed system provides automated image analysis, metadata structuring, visualization of model predictions and the possibility of expert marking and can be used not only by specialized doctors during medical examinations and studies, but also by general practitioners and mid-level medical personnel during screening examinations, mobile preventive appointments and medical examinations.

Keywords: a doctor's decision support system; dermatoscopic images; skin growths; machine learning.

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

For citation: Kozachok E.S., Seregin S.S., Kozachok A.V., Eleckij K.V., Samovarov O.I. Intelligent system for supporting physician decision-making in skin neoplasm diagnostics based on dermatoscopic image analysis. *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(3):50–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-50-65>

Received 06.07.2025

Accepted 04.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

Злокачественные новообразования кожи представляют одну из наиболее значимых проблем современной онкологии. По данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно в мире регистрируется более 2 миллионов случаев немеланомных злокачественных новообразований кожи и порядка 130 тысяч случаев меланомы [1]. В Российской Федерации статистика также свидетельствует о росте онкозаболеваемости кожи среди населения. По данным Министерства здравоохранения Российской Федерации, в 2023 г. было зарегистрировано около 70 случаев злокачественных новообразований кожи на 100 000 населения, из которых порядка 9% приходилось на меланому [2]. Высокая смертность при позднем выявлении и сложность ранней диагностики определяют актуальность разработки и внедрения подходов и методов ранней диагностике злокачественных новообразований.

Одним из наиболее информативных и широко применяемых методов диагностики является дерматоскопия, позволяющая выявлять ранние признаки злокачественных новообразований, невидимые

при проведении визуального осмотра пациента. При этом эффективность дерматоскопии зависит как от опыта и квалификации врача, так и от качества дерматоскопа и характеризуется показателем точности диагностики злокачественных новообразований кожи в 65–85% [3]. Для повышения точности ранней диагностики активно разрабатываются и внедряются информационные системы поддержки принятия решений врача, основанные на применении методов машинного обучения и распознавания образов, позволяющие анализировать дерматоскопические изображения с высокой точностью.

В мировой медицинской практике исследовательские медицинские центры и клиники Германии, США, Израиля и Китая применяют алгоритмы на основе сверточных нейронных сетей, интегрированные в мобильные и стационарные платформы при разработке систем поддержки принятия решений врача, характеризующиеся чувствительностью 87% и специфичностью 77%, что превосходит показатели специалистов узкой специализации (80% и 74% соответственно)¹. В России направление по

¹ Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации здравоохранения: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 17 апреля 2024 г.

№ 959-р. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408813257/?ysclid=mgrqze2ugn607226848> (дата обращения: 11.06.2025).

созданию и внедрению систем поддержки принятия решений врача для ранней диагностики злокачественных новообразований кожи, основанных на анализе дерматоскопических изображений, в медицинскую практику является одним из актуальных направлений [4].

По данным Аналитического центра при Правительстве Российской Федерации за 2022 г., из 65 компаний, работающих в области внедрения подходов искусственного интеллекта в медицине, около 35% сосредоточены на анализе медицинских изображений. В перечне зарегистрированных медицинских изделий, построенных с применением методов искусственного интеллекта, 72% имеют отношение к визуальной диагностике [5]. В рамках государственной стратегии «Цифровое здравоохранение» планируется внедрение минимум 12 сервисов, содержащих методы искусственного интеллекта, в каждом регионе Российской Федерации до 2030 г., включая дерматологические решения [6].

При этом наличие значительной вовлеченности различных компаний в разработке и создании информационных систем поддержки принятия решений врача, основанных на анализе дерматоскопических изображений, отличается единичными случаями создания и внедрения медицинских изделий для ранней диагностики злокачественных кожных новообразований в медицинскую практику [7]. Указанные особенности делают задачу по разработке и внедрению интеллектуальной системы поддержки принятия решений врача в диагностике

новообразований кожи на основе анализа дерматоскопических изображений актуальным направлением исследований.

Материалы и методы

В процессе разработки интеллектуальной системы поддержки принятия решений врача, предназначеннной для диагностики новообразований кожи, сформированы требования, предъявляемые к системам данного типа [8]:

- поддержка различных форматов представления дерматоскопических изображений (PNG, BMP, JPEG, JPG, GIF, TIFF и т. д.);
- применение методов и алгоритмов машинного обучения (теории распознавания образов) для распознавания типа новообразования кожи;
- клиент-серверная архитектура взаимодействия компонентов интеллектуальной системы;
- совместимость с различными типами дерматоскопов (дерматоскопического оборудования);
- адаптация к различным сценариям применения (в том числе в условиях ограниченных ресурсов);
- обеспечение требуемого уровня точности обнаружения новообразований кожи при воспроизводимости диагностики [9].

Исходя из представленных требований разработана интеллектуальная система поддержки принятия решений врача на основе анализа дерматоскопических изображений, реализованная в виде клиент-серверной инфраструктуры.

Разработанная информационная система поддержки принятия решений врача реализует функционал автоматизированного анализа дерматоскопических изображений кожных новообразований на основе предложенных алгоритмов классификации, построенных с использованием методов глубокого обучения. Основой для построения системы послужил специально сформированный уникальный набор данных, содержащий

дерматоскопические изображения с клинически верифицированной разметкой и расширенными метаданными, включая сведения о фототипе кожи, возрастных, анатомических и визуальных характеристиках новообразований, что позволило обеспечить адаптацию решений к популяционным особенностям пациентов на территории Российской Федерации. Рассмотрим структуру разработанной интеллектуальной системы (рис. 1).



Рис. 1. Структура интеллектуальной системы поддержки принятия решений врача

Fig. 1. Intelligent decision support system for physicians' structure

Интеллектуальная система поддержки принятия решений врача состоит из следующих компонент [10]:

1. Компонента пользователя (пользовательский интерфейс). Представляет собой веб-приложение с функционалом личного кабинета врача, реализующего следующие функции:

- захват (формирование) дерматоскопического изображения кожного новообразования пациента;
- создание анкеты пациента с возможностью добавления в нее дерматоскопических снимков, метаданных и

результатов клинических исследований новообразований кожи (биопсия и гистологический анализ);

- осуществление разметки дерматоскопических изображений кожных новообразований, в т. ч. несколькими специалистами с применением алгоритмов формирования итогового результата;
- передача размеченных дерматоскопических изображений на серверную компоненту для анализа;
- получение результатов анализа кожных новообразований и формирование отчета по дерматоскопии [11].

2. Серверная (облачная) компонента.

Представляет собой серверную или облачную инфраструктуру (в зависимости от реализации) для осуществления сбора дерматоскопических изображений, формирования набора данных дерматоскопических изображений новообразований кожи, разметки клинически значимых признаков кожных новообразований,

обучения алгоритмов классификации, осуществления классификации дерматоскопических изображений на сформированном наборе данных и формировании результатов проведенного анализа (классификации) в виде отчета. Архитектура серверной (облачной) компоненты интеллектуальной системы представлена ниже (рис. 2).

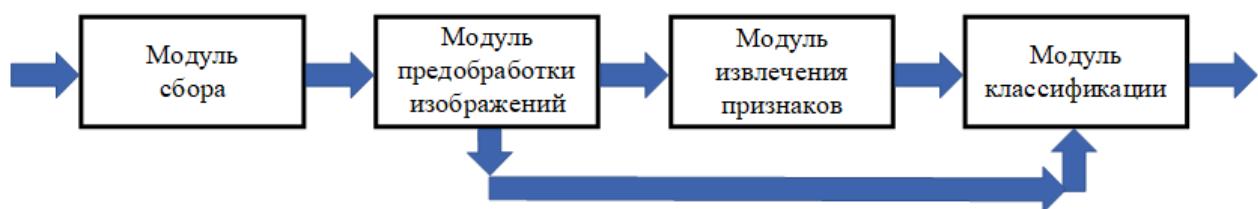


Рис. 2. Архитектура серверной (облачной) компоненты интеллектуальной системы поддержки принятия решений врача

Fig. 2. Server (cloud) component architecture of the intelligent decision support system for a physician

Серверная (облачная) компонента включает следующие модули [12]:

- модуль сбора, обеспечивающего взаимодействие клиентской и серверной компонент и осуществляющего загрузку на сервер дерматоскопических изображений и метаданных, их обработку, хранение и последующую передачу на модули разметки и представления;

- модуль предобработки изображений, предназначенный для обеспечения стандартизации процесса разметки дерматоскопических изображений врачами онкологами и/или дерматологами, а также предварительной обработки дерматоскопических изображений, включающей сегментацию и удаление шумовых эффектов. Кроме того, модуль предобработки реализует функцию визуализации, фильтрации и сортировки изображений по различным критериям из сформированного набора данных модулем сбора, а также вывод загруженных

изображений для отображения или проведения визуального анализа [13];

- модуль извлечения признаков, реализующий процедуру подготовки обучающего набора данных и последующего обучения алгоритмов классификации на подготовленном наборе данных. В качестве используемых алгоритмов классификации используются алгоритмы глубокого обучения, реализующих архитектуру сверточных нейронных сетей и визуальных трансформеров. В процессе обучения алгоритмов классификации был использован подход автоматического обучения моделей и алгоритмов сверточных нейронных сетей для повышения точности обучения и оптимизации гиперпараметров моделей [14];

- модуль классификации, осуществляющий классификацию анализируемых изображений согласно используемой нозологии кожных новообразований, а также посредством обученных

моделей и алгоритмов классификации. Модуль классификации позволяет реализовать один из двух подходов к классификации (по используемой нозологии): многоклассовая классификация злокачественных новообразований (отнесение к одной из диагностических категорий: доброкачественное образование, меланома, невус, базальноклеточная карцинома, актинический кератоз, дерматофиброма, сосудистые поражения кожи и плоскоклеточный рак) и бинарная каскадная двухэтапная классификация (на первом этапе: определение принадлежности к меланоцитарной/ немеланоцитарной группе, на втором – дифференциация между меланомой и невусом).

В ходе практической реализации клиентской компоненты системы поддержки принятия решений врача в

диагностике новообразований кожи на основе анализа дерматоскопических изображений использованы следующие технологии и средства разработки для визуализации пользовательского интерфейса, такие как библиотеки разработки Fabric.js, OpenSeadragon и фреймворк Vue, обеспечивающие масштабирование и аннотирование, а также поддержку добавления новых функций и возможность адаптации графического интерфейса.

Для обеспечения надежного и быстрого взаимодействия с серверной частью веб-приложение работает через интерфейс REST API, используя формат JSON для передачи данных. Практическая реализация серверной компоненты интеллектуальной системы основана на стеке технологий, представленных ниже (рис. 3).

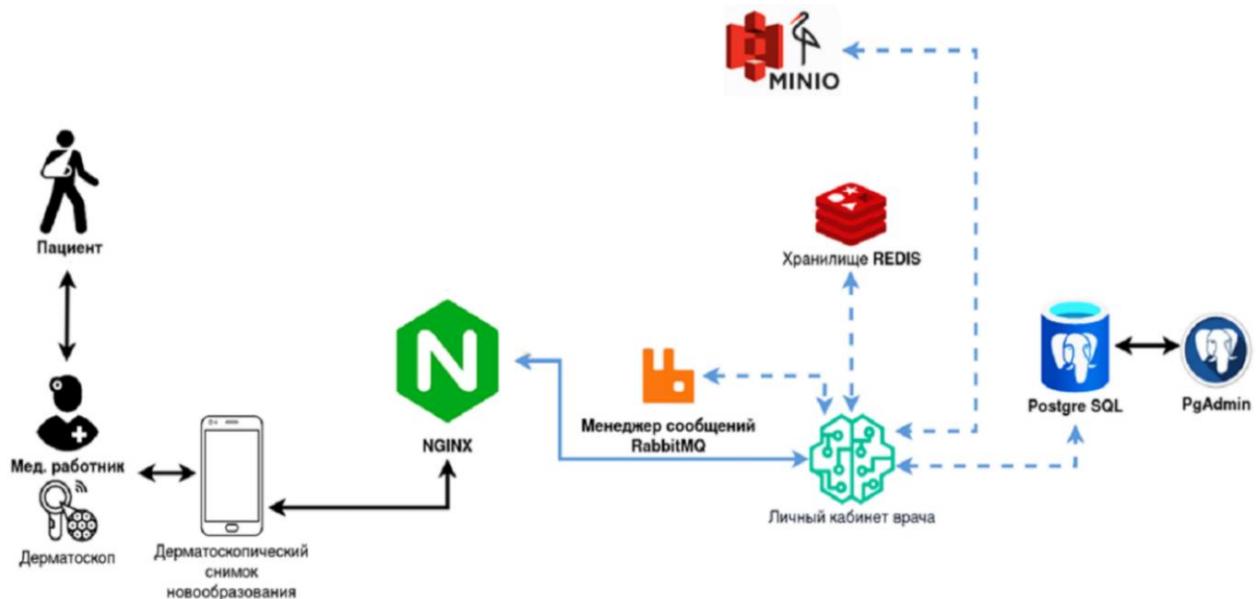


Рис. 3. Стек используемых технологий при разработке интеллектуальной системы поддержки принятия решений врача

Fig. 3. Stack of technologies used in the development of an intelligent decision support system for physicians

К применяемому стеку технологий и средствам разработки относятся:

– балансировщик нагрузки Nginx выполняет роль веб-сервера и обратного

прокси-сервера, обеспечивая безопасную и быструю передачу данных между пользователями и сервером. Кроме того, Nginx отвечает за распределение входящих запросов на сервер между несколькими серверами, обеспечивая масштабируемость и отказоустойчивость функционирования системы;

- менеджер (брокер) сообщений RabbitMQ представляет собой систему обмена сообщениями, обеспечивающую асинхронное взаимодействие и маршрутизацию между компонентами системы. Функционирует на базе протокола AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) и обеспечивает надежную передачу изображений, результатов анализа и разметки из web-приложения пользователя на серверную часть;

- файловое хранилище MinIO, применяемое для хранения изображений, отправляемых на сервер. MinIO поддерживает протоколы S3 для локального хранения изображений, отправляемых пользователями на серверную часть для анализа;

- хранилище Redis, выступающее в качестве внутренней памяти ключей-значений, используемой для хранения временных данных, таких как сессии пользователей, кэшированных данных и другие данные, используемых системой для быстрого доступа;

- база данных PostgreSQL и система управления базами данных pgAdmin. PostgreSQL используется для хранения постоянных данных, таких как информация о пациентах, изображениях и результатах анализа. pgAdmin предназначена для управления базой данных и выполнения запросов к ней.

Для решения задачи классификации дерматоскопических изображений обосновано применение модели виртуального трансформера SeyedAli/Melanoma-Classification для многоклассовой классификации и модели microsoft/swinv2-tiny-patch4 на первом этапе бинарной каскадной классификации, а также SeyedAli/Melanoma-Classification – для второго этапа бинарной каскадной классификации.

Результаты и их обсуждение

Программная реализация разработанной интеллектуальной системы поддержки принятия решения врача представлена в виде облачного сервиса с доступом через веб-браузер (<https://cab.ai-melanoma.ru/>), а также мобильного приложения, доступного для операционных систем Android и iOS. Главное окно пользовательского интерфейса облачного сервиса представлено ниже (рис. 4).

Пользовательский интерфейс (личный кабинет врача) позволяет:

- создавать анкету пациента, содержащую детальную информацию: возраст, пол, тип волос, тип кожи, расположение и количество родинок, наследственность, прием препаратов или наличие заболеваний, наличие веснушек, фототип кожи и наличие ожогов;

- загружать дерматоскопические изображения новообразований кожи, результаты проведенных гистологических и клинических исследований, а также осуществлять анализ и разметку клинически значимых признаков (рис. 5).

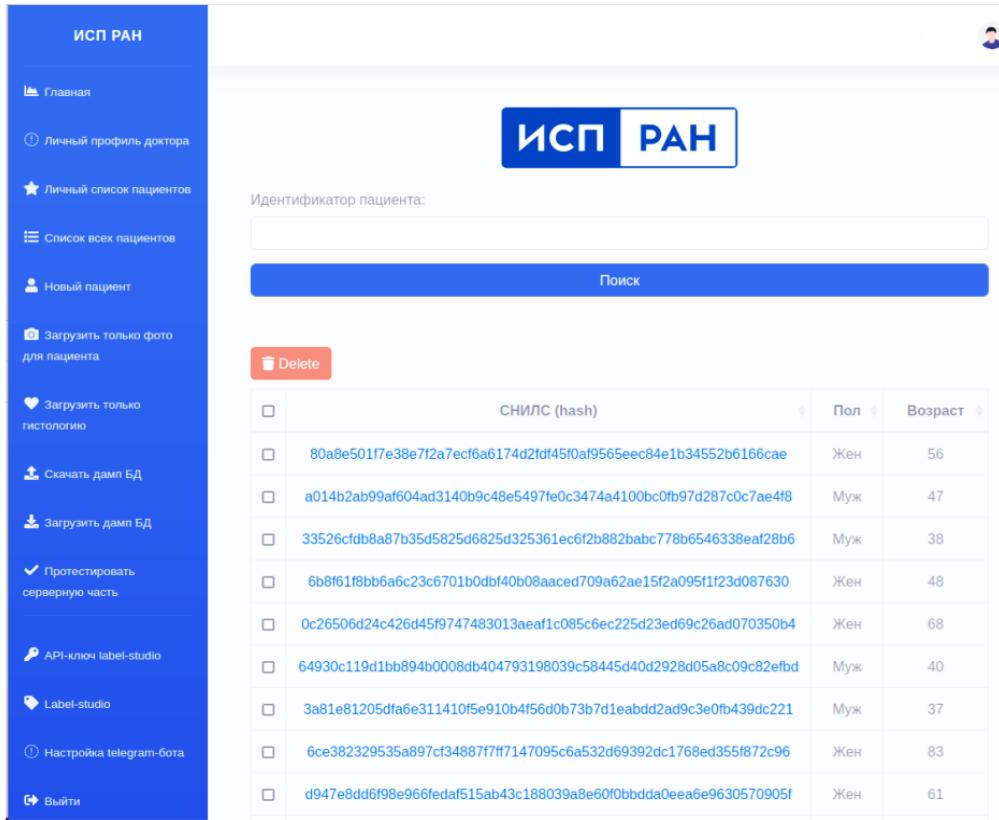


Рис. 4. Пользовательский интерфейс интеллектуальной системы поддержки принятия решений врача

Fig. 4. User interface of the intelligent decision support system for physicians

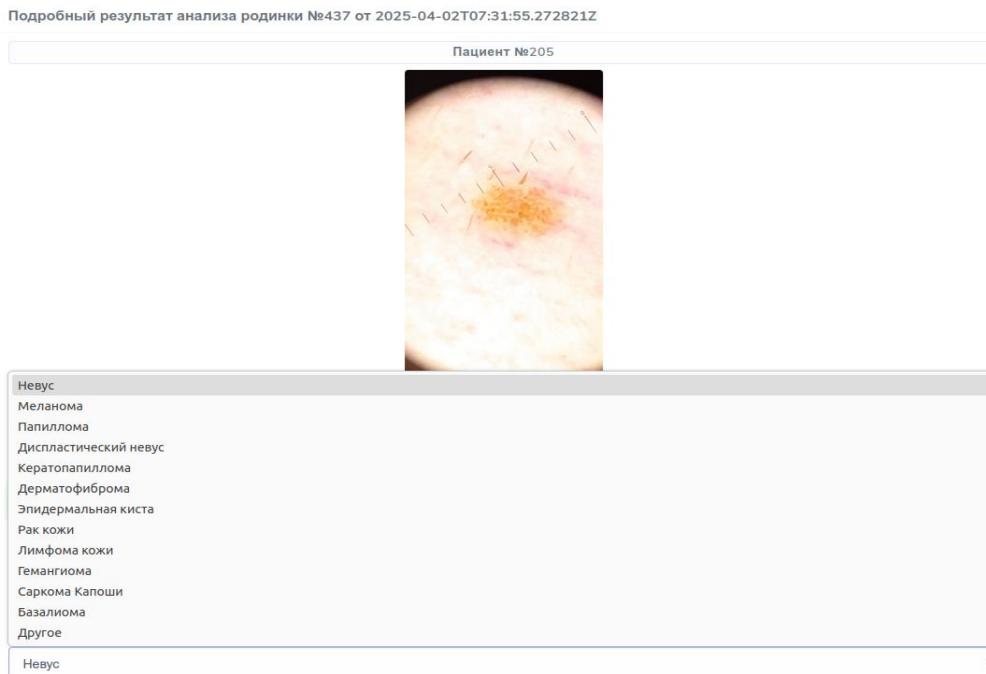


Рис. 5. Пользовательский интерфейс интеллектуальной системы поддержки принятия решений врача

Fig. 5. User interface of the intelligent decision support system for physicians

Пользовательский интерфейс позволяет осуществлять сбор дерматоскопических изображений, формирование наборов данных для обучения моделей и алгоритмов машинного обучения. В ходе проведения профилактических приемов пациентов дерматовенерологического профиля посредством применения разработанной интеллектуальной системы поддержки принятия решения

врача сформирован набор дерматоскопических изображений клинически верифицированных случаев меланоцитарных и немеланоцитарных новообразований, учитывающих фототипы кожи населения России (I–IV фототипы по классификации Фишпатрика). Рассмотрим структуру сформированного набора (табл. 1).

Таблица 1. Распределение изображений по типам кожных новообразований в сформированном наборе данных дерматоскопических изображений

Table 1. Image distribution by skin lesions in the generated dataset of dermatoscopic images

Кол-во изображений Images	Невус Nev	Себорейный кератоз SK	Меланома Mel	Сосудистые поражения VL	Дерматофиброма DF	Базальноклеточная карцинома BCC	Плоскоклеточный рак SC
657	353	116	75	61	19	18	15

Сформированный набор дерматоскопических изображений применяется для обучения используемых алгоритмов классификации совместно с набором данных ISIC-2019.

В ходе обучения используемых алгоритмов классификации, основанных на моделях визуальных трансформеров, получены следующие результаты тестирования моделей:

- многоклассовая классификация (модель SeyedAli/Melanoma-Classification): показатель Accuracy – 93,2%, F-мера – 89,1%;

- двухэтапная бинарная классификация: первый этап: модель microsoft/swinv2-tiny-patch4, показатель Accuracy – 95,4%, F-мера – 94,8%, второй этап: модель

SeyedAli/ Melanoma-Classification, показатель Accuracy – 96,4%, F-мера – 95,1%.

Полученные результаты верификации моделей позволили перейти к экспериментальным оценкам разработанной интеллектуальной системы поддержки принятия решений врача на основе анализа дерматоскопических изображений. Практическая апробация разработанной системы проводилась в реальных клинических условиях в рамках серии профилактических мероприятий под названием «День меланомы», организованных на базе медицинских учреждений и при поддержке просветительской платформы Melanoscope (<https://melanoscope.ru>).

В рамках апробации применялась методика скринингового обследования для ранней дифференциальной диагностики меланоцитарных новообразований кожи с использованием мобильной дерматоскопии, включающая получение

высококачественных дерматоскопических изображений с помощью оптического дерматоскопа в сочетании со смартфоном, а также их последующий автоматизированный анализ на базе разработанной системы (рис. 6).

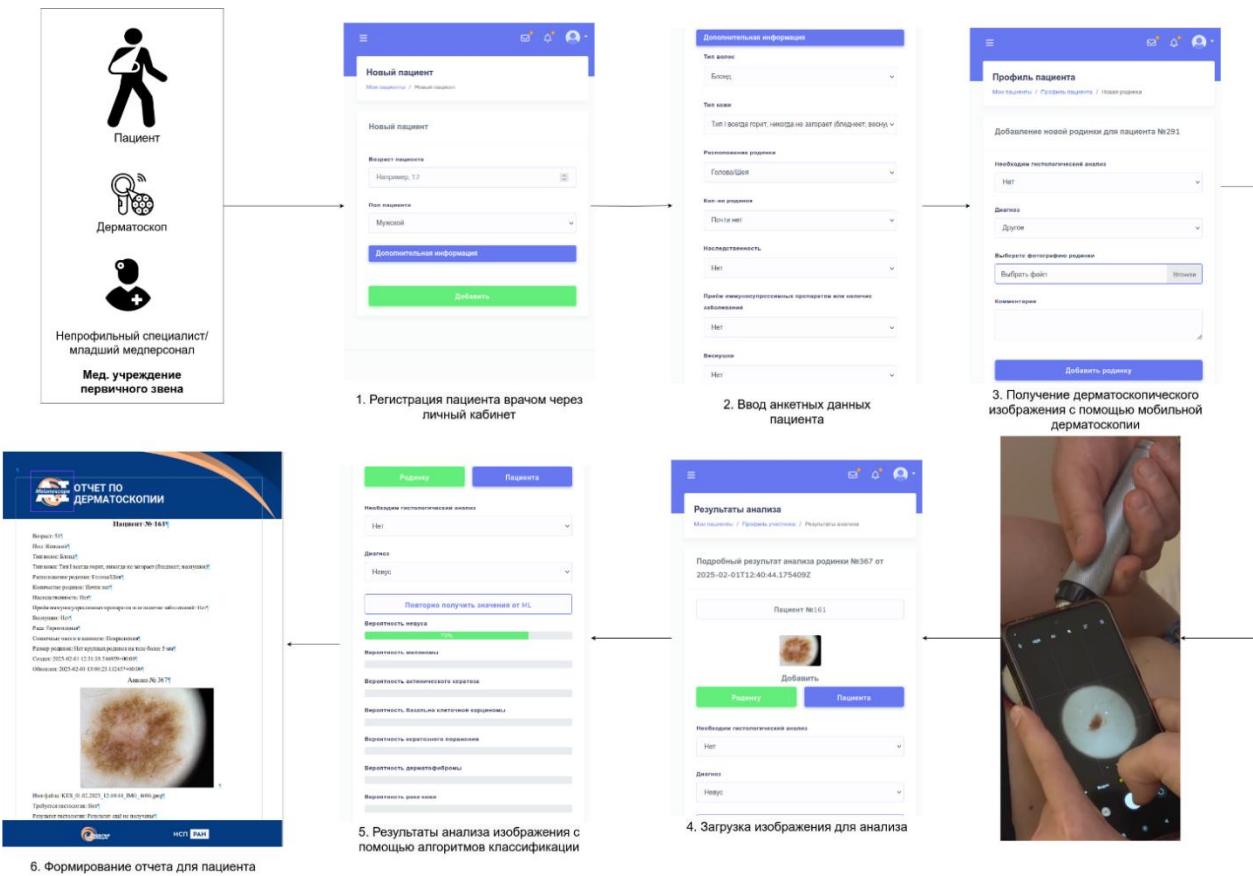


Рис. 6. Применение интеллектуальной системы поддержки принятия решений врача для диагностики новообразований кожи

Fig. 6. Application of an intelligent decision support system for physicians to diagnose skin neoplasms

В ходе шести отдельных сессий, прошедших с ноября 2024 г. по июнь 2025 г., было бесплатно обследовано более 250 пациентов, обратившихся по собственному желанию для прохождения дерматоскопического скрининга новообразований кожи. Каждому пациенту выполнялась мобильная дерматоскопия, после чего изображения автоматически анализировались с помощью

разработанной системы. Модуль системы классифицировал новообразования по диагностическим категориям, интерпретируемые врачом-специалистом. В результате проведенных мероприятий было выявлено 9 случаев меланомы, 6 случаев базальноклеточной карциномы и более 30 случаев атипичных (диспластических)nevusов.

Выводы

Результаты работы системы были сопоставлены с заключениями врачей-дерматологов и онкологов, принимавших участие в обследованиях. По итогам мероприятий установлено что:

- среднее время анализа одного изображения сократилось на 30–40 % по сравнению с традиционным ручным протоколом;
- в 89% случаев наблюдалось совпадение между результатами автоматической классификации и клиническим заключением врача;
- система продемонстрировала устойчивость к реальным условиям съемки: изображения варьировались по качеству, содержали артефакты (волосы, линейки, неровное освещение), но были успешно обработаны без снижения точности.

Особенно важным результатом является возможность применения интеллектуальной системы не только в стационарных, но и в мобильных клинических условиях: система успешно функционировала как в веб-интерфейсе, так и в мобильном приложении. Это делает интеллектуальную систему поддержки принятия решений врача перспективным инструментом для массового скрининга, профилактических осмотров и телемедицинских консультаций.

На основе опыта апробации были сформированы рекомендации по интеграции интеллектуальной системы поддержки принятия решений врача в

рабочие процессы медицинских учреждений, включая:

- возможность использования системы в рамках скрининговых обследований, выездных профилактических приемов и диспансеризации;
- настройку интеллектуальной системы поддержки принятия решений врача как дополнительного модуля к существующим медицинским информационным системам;
- организацию регулярного скрининга в малоресурсных учреждениях (ФАПы, ЦРБ) с использованием мобильного приложения;
- отсутствие привязки к конкретному дерматоскопу: система совместима с широким спектром оптических устройств, что расширяет применимость решения;
- возможность массового скрининга с целью первичной фильтрации пациентов, снижения количества необоснованных направлений в онкологические диспансеры и повышения эффективности маршрутизации;
- ориентированность на врачей общей практики и среднего медперсонала, особенно в отдаленных и сельских районах, где отсутствуют профильные врачи-дерматологи/онкологи.

Таким образом, проведенная апробация подтвердила технологическую готовность системы к внедрению, ее клиническую применимость и значимость для повышения онконастороженности врачей при работе с кожными новообразованиями на этапе первичной диагностики.

Список литературы

1. Dermoscopy compared with naked eye examination for the diagnosis of primary melanoma: a meta-analysis of studies performed in a clinical setting / M. E. Vestergaard, P. Macaskill, P. E. Holt, S. W. Menzies // British Journal of Dermatology. 2008. Vol. 159, N 3. P. 669–676. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2008.08713.x>
2. Artificial Intelligence in Dermatology: A Systematic Review of Its Applications in Melanoma and Keratinocyte Carcinoma Diagnosis / N. Jairath, V. Pahalyants, R. Shah, J. Weed, J. A. Carucci, M. C. Criscito // Dermatologic Surgery. 2024. Vol. 50, N 9. P. 791–798. <https://doi.org/10.1097/DSS.0000000000004223>
3. Deep neural networks are superior to dermatologists in melanoma image classification / T. J. Brinker, A. Hekler, A. H. Enk, C. Berking, S. Haferkamp, A. Hauschild, M. Weichenthal // European Journal of Cancer. 2019. Vol. 119. P. 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2019.05.023>
4. Adamson A. S., Smith A. Machine Learning and Health Care Disparities in Dermatology // JAMA Dermatology. 2018. Vol. 154, N 11. C. 23–48. <https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2018.2348>
5. A systematic review and meta-analysis of artificial intelligence versus clinicians for skin cancer diagnosis / M. P. Salinas, J. Sepulveda, L. Hidalgo, D. Peirano, M. Morel, P. Uribe // NPJ Digital Medicine. 2024. Vol. 7, N 125. P. 1–23. <https://doi.org/10.1038/s41746-024-01103-x>
6. Платформа для сбора дерматоскопических изображений новообразований пациентов / А. В. Козачок, А. А. Спирина, К. В. Елецкий, Е. С. Козачок // Труды Института системного программирования РАН. 2024. Т. 36, №. 3. С. 259–272. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2024-36\(3\)-18](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2024-36(3)-18)
7. UI/UX Design Of Mobile-Based Pharmacy Application Using Design Thinking Method / S. Suryani, N. Nurdiansah, F. Faizal, N. Nirwana, A. Metekohy // Journal of Computer Networks, Architecture and High Performance Computing. 2023. Vol. 5, N 2. P. 714–723. <https://doi.org/10.47709/cnahpc.v5i2.2811>
8. Familoni B. T., Babatunde S. O. User experience (UX) design in medical products: theoretical foundations and development best practices // Engineering Science & Technology Journal. 2024. Vol. 5, N 3. P. 1125–1148. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i3.975>
9. Features recognition from piping and instrumentation diagrams in image format using a deep learning network / E. S. Yu, J. M. Cha, T. Lee, J. Kim, D. Mun // Energies. 2019. Vol. 12, N 23. P. 1–19. <https://doi.org/10.3390/en12234425>
10. Skin Cancer Detection with Metadata Using Deep Learning Strategies / N. Devarakonda, M. Murthy, R. Reddy, P. S. Harsha // Advances in Communication and Applications

11. Применение моделей машинного обучения для многоклассовой классификации дерматоскопических снимков новообразований кожи / А. В. Козачок, А. А. Спирин, О. И. Самоваров, Е. С. Козачок // Труды Института системного программирования РАН. 2024. Т. 36, № 5. С. 241–252. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2024-36\(5\)-17](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2024-36(5)-17)

12. Хабарова Р. И., Кулева С. А. Искусственный интеллект в диагностике доброкачественных новообразований кожи у пациентов детского возраста. Интеграция нейронной сети в мобильное приложение // Вопросы онкологии. 2022. Т. 68, № 6. С. 820–826. <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2022-68-6-820-826>

13. A survey, review, and future trends of skin lesion segmentation and classification / H. Kamrul, A. Asif, H. Y. Choon, Y. Guang // Computers in Biology and Medicine. 2023. Vol. 155. С. 1–36. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2023.106624>

14. Automatic melanoma detection using discrete cosine transform features and metadata on dermoscopic images / S. Yousefi, S. Najjar-Ghabel, R. Danehchin, S. S. Band, C. C. Hsu, A. Mosavi // Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences. 2024. Vol. 36, N 2. P. 101944. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2024.101944>

References

1. Vestergaard M.E., Macaskill P., Holt P.E., Menzies S.W. Dermoscopy compared with naked eye examination for the diagnosis of primary melanoma: a meta-analysis of studies performed in a clinical setting. *British Journal of Dermatology.* 2008;159(3):669–676. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2008.08713.x>
2. Jairath N., Pahalyants V., Shah R., Weed J., Carucci J.A., Criscito M.C. Artificial Intelligence in Dermatology: A Systematic Review of Its Applications in Melanoma and Keratinocyte Carcinoma Diagnosis. *Dermatologic Surgery.* 2024;50(9):791–798. <https://doi.org/10.1097/DSS.0000000000004223>
3. Brinker T.J., Hekler A., Enk A.H., Berking C., Haferkamp S., Hauschild A., Weichenthal M. Deep neural networks are superior to dermatologists in melanoma image classification. *European Journal of Cancer.* 2019;119:11–17. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2019.05.023>
4. Adamson A.S., Smith A. Machine Learning and Health Care Disparities in Dermatology. *JAMA Dermatology.* 2018;154(11):23–48. <https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2018.2348>
5. Salinas M.P., Sepulveda J., Hidalgo L., Peirano D., Morel M., Uribe P. A systematic review and meta-analysis of artificial intelligence versus clinicians for skin cancer diagnosis. *NPJ Digital Medicine.* 2024;7(125):1–23. <https://doi.org/10.1038/s41746-024-01103-x>
6. Kozachok A.V., Spirin A.A., Elezkiy K.V., Kozachok E.S. A platform for collecting dermatoscopic images of patients' neoplasms. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya*

RAN = Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences. 2024;36(3): 259–272. (In Russ.) [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2024-36\(3\)-18](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2024-36(3)-18)

7. Suryani S., Nurdiansah N., Faizal F., Nirwana N., Metekohy A. UI/UX Design Of Mobile-Based Pharmacy Application Using Design Thinking Method. *Journal of Computer Networks, Architecture and High Performance Computing.* 2023;5(2):714–723. <https://doi.org/10.47709/cnahpc.v5i2.2811>

8. Familoni B.T., Babatunde S.O. User experience (UX) design in medical products: theoretical foundations and development best practices. *Engineering Science & Technology Journal.* 2024;5(3):1125–1148. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i3.975>

9. Yu E.S., Cha J.M., Lee T., Kim J., Mun D. Features recognition from piping and instrumentation diagrams in image format using a deep learning network. *Energies.* 2019;12(23):1–19. <https://doi.org/10.3390/en12234425>

10. Devarakonda N., Murthy M., Reddy R., Harsha P.S. Skin Cancer Detection with Metadata Using Deep Learning Strategies. *Advances in Communication and Applications. (ERCICA 2023).* Singapore: Springer; 2024. P. 217–233. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7633-1_16

11. Kozachok A.V., Spirin A.A., Samovarov O.I., Kozachok E.S. Application of machine learning models for multiclass classification of dermatoscopic images of skin neoplasms. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN = Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences.* 2024; 36(5):241–252. (In Russ.) [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2024-36\(5\)-17](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2024-36(5)-17)

12. Khabarova R.I., Kulyova S.A. Artificial intelligence in the diagnosis of benign skin tumors in pediatric patients. Neural network integration into a mobile application. *Voprosy onkologii = Oncology Issues.* 2022; 68(6):820–826. (In Russ.) <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2022-68-6-820-826>

13. Kamrul H., Asif A., Choon H.Y., Guang Y. A survey, review, and future trends of skin lesion segmentation and classification. *Computers in Biology and Medicine.* 2023;155:1–36. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2023.106624>

14. Yousefi S., Najjar-Ghabel S., Danehchin R., Band S.S., Hsu C.C., Mosavi A. Automatic melanoma detection using discrete cosine transform features and metadata on dermoscopic images. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences.* 2024;36(2):101944. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2024.101944>

Информация об авторах / Information about the Authors

Козачок Елена Сергеевна, сотрудник, Институт системного программирования им. В. П. Иванникова РАН, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: e.kozachok@ispras.ru, ORCID: 0000-0003-152-4714

Серегин Сергей Сергеевич, кандидат медицинских наук, врач-онколог, Бюджетное учреждение здравоохранения Орловской области «Орловский онкологический диспансер», г. Орел, Российская Федерация, e-mail: serega_s2004@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7248-402X

Козачок Александр Васильевич, доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией Институт системного программирования им. В. П. Иванникова РАН, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: a.kozachok@ispras.ru, ORCID: 0000-0002-6501-2008

Елецкий Кирилл Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник, Институт системного программирования им. В. П. Иванникова РАН, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: k.eletskiy@ispras.ru, ORCID: 0009-0001-1434-9620

Самоваров Олег Ильгисович, кандидат технических наук, ученый секретарь, Институт системного программирования им. В. П. Иванникова РАН, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: samov@ispras.ru, ORCID: 0000-0002-7006-7193

Elena S. Kozachok, Employer, Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: e.kozachok@ispras.ru, ORCID: 0000-0003-152-4714

Sergey S. Seregin, Candidate of Sciences (Medicine), Oncologist, Budgetary Healthcare Institution of the Oryol Region "Oryol Oncology Dispensary", Oryol, Russian Federation, e-mail: serega_s2004@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7248-402X

Alexander V. Kozachok, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Head of Laboratory, Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: a.kozachok@ispras.ru, ORCID: 0000-0002-6501-2008

Kirill V. Eleckij, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Research Assistant, Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: k.eletskiy@ispras.ru, ORCID: 0009-0001-1434-9620

Oleg I. Samovarov, Candidate of Sciences (Engineering), Scientific Secretary, Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: samov@ispras.ru, ORCID: 0000-0002-7006-7193

Comparison of machine learning algorithms for dynamic robot path planning

Aigerim B. Kaimakova¹ , Zhomart U. Aldamuratov¹

¹ Kazakh-British Technical University
59 Tole Bi Str., Almaty 050000, Republic of Kazakhstan

Abstract

The purpose of research. The purpose of this scientific work is to conduct a comprehensive theoretical and analytical review of modern machine learning algorithms used to solve the problems of dynamic route planning for mobile robots. The main focus is on a comparative assessment of the effectiveness of various learning paradigms – reinforcement learning, teacher-based learning, and hybrid approaches – in a changing and uncertain environment where rapid adaptation, learnability, and algorithm stability are important.

Methods. The study is based on an analysis of more than 40 peer-reviewed scientific publications selected from leading international academic databases for the period from 2020 to 2024. A structured methodology was used, including descriptive, comparative, and analytical approaches. The main evaluation criteria were: convergence rate; computational efficiency; generalization ability; noise tolerance; adaptability to real-time and stable behavior in changing conditions.

Results. It is shown that tabular algorithms provide basic navigation functionality, but they do not scale for complex tasks. Deep models have a high degree of adaptability and efficiency. Teaching with a teacher demonstrates accuracy in the presence of expert data, but is vulnerable to the accumulation of errors. Hybrid architectures combining graph neural networks and symbolic modeling achieve the best interpretability and stability in an unstable environment.

Conclusion. The results obtained form a reliable theoretical basis for the selection and application of autonomous navigation algorithms. The comparative analysis highlights the value of flexible, scalable, and explicable models in intelligent robotics systems of a new generation.

Keywords: dynamic path planning; machine learning; behavioral cloning; deep Q-networks; proximal policy optimization; mobile robots; autonomous navigation.

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

Received 18.07.2025

Accepted 15.08.2025

Published 30.09.2025

Сравнение алгоритмов машинного обучения для динамического планирования пути робота

А. Б. Каймакова¹✉, Ж. У. Алдамуратов¹

¹ Казахстанско-Британский технический университет
ул. Толе би, д. 59, г. Алматы 050000, Республика Казахстан

✉ e-mail: ai_kaimakova@kbtu.kz

Резюме

Цель исследования. Целью настоящей научной работы является проведение комплексного теоретического и аналитического обзора современных алгоритмов машинного обучения, применяемых для решения задач динамического планирования маршрутов мобильных роботов. Основное внимание уделяется сравнительной оценке эффективности различных парадигм обучения: обучения с подкреплением, обучения с учителем и гибридных подходов – в условиях изменяющейся и неопределенной среды, где важна оперативная адаптация, обучаемость и устойчивость алгоритма.

Методы. Исследование основано на анализе более 40 рецензируемых научных публикаций, отобранных из ведущих международных академических баз данных за период с 2020 по 2024 гг. Применялась структурированная методология, включающая описательные, сравнительные и аналитические подходы. В качестве основных критерии оценки использовались: скорость сходимости; вычислительная эффективность; способность к обобщению; устойчивость к шуму; адаптивность к реальному времени и стабильность поведения в изменяющихся условиях.

Результаты. Показано, что табличные алгоритмы обеспечивают базовую навигационную функциональность, но не масштабируются для сложных задач. Глубинные модели обладают высокой степенью адаптивности и эффективности. Обучение с учителем демонстрирует точность при наличии экспертных данных, но уязвимо к накоплению ошибок. Гибридные архитектуры, сочетающие графовые нейросети и символическое моделирование, достигают наилучших показателей интерпретируемости и устойчивости в условиях нестабильной среды.

Заключение. Полученные результаты формируют надежную теоретическую основу для выбора и применения алгоритмов автономной навигации. Сравнительный анализ подчеркивает ценность гибких, масштабируемых и объяснимых моделей в интеллектуальных робототехнических системах нового поколения.

Ключевые слова: динамическое планирование пути; машинное обучение; поведенческое клонирование; глубокие Q-сети; проксимальная оптимизация политики; мобильные роботы; автономная навигация.

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

Для цитирования: Каймакова А. Б., Алдамуратов Ж. У. Сравнение алгоритмов машинного обучения для динамического планирования пути робота // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 3. С. 66–73. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-66-78>

Поступила в редакцию 18.07.2025

Подписана в печать 15.08.2025

Опубликована 30.09.2025

Introduction

Dynamic path planning refers to the autonomous computation of collision-free trajectories in environments that change over time. This class of algorithms plays a pivotal role in enabling robots to react in real time to environmental dynamics, ensuring safe and continuous operation in complex scenarios [1]. Unlike static planning, which assumes a fixed map and immutable surroundings, dynamic path planning is built to handle uncertainty and the constant movement of objects, humans, or terrain features. One of the recent technological advances in this area involves the hybridization of the Sparrow Search Algorithm with the Dynamic Window Approach. This combination has demonstrated significant improvements in path efficiency and obstacle avoidance across variable-speed environments, as shown in trajectory simulations with dynamic obstacle fields [2]. At the same time, adaptive dynamic programming has been used to reformulate path planning as a continuous-time optimal control problem, allowing robots to adjust to rapid changes in their local context, especially in narrow indoor corridors and crowded environments [1].

The application of deep reinforcement learning, particularly the Soft Actor-Critic (SAC) model, has further strengthened dynamic decision-making in robotics. SAC

achieves stable trajectory convergence even in cluttered and continuously shifting environments, as evidenced in IFAC benchmark trials using multiple mobile platforms [3]. In parallel, a growing body of analytical reviews has highlighted the transition from deterministic search algorithms to learning-based systems capable of real-time replanning, reflecting the evolving demands of mobile autonomy in dynamic environments [4]. Mobile robots operating in shared indoor spaces or urban outdoor settings must often combine path planning with real-time tracking. Dynamic programming approaches used in such cases offer low-latency updates to control signals, even when robots face discontinuous obstacle movement and occlusion [5]. These methods are also actively adapted for planetary rovers and field robots, where environmental variability can occur due to weather, terrain shift, or autonomous system degradation. An extensive review of classical and modern path planning strategies has outlined the progression from grid-based techniques to biologically inspired metaheuristics and AI-integrated models. This trajectory of development marks a shift from local safety to global optimization, integrating spatial prediction and adaptive feedback [6]. Likewise, the use of path planning in advanced autonomous systems increasingly requires the fusion of sensory data with predictive

models, as demonstrated by robot platforms tested with LiDAR and stereo vision under dynamic constraints [7].

Experimental work has also focused on the integration of Ant Colony Optimization (ACO) with reactive models such as DWA. The hybrid ACO-DWA algorithm, tested in both simulated and physical environments, achieves path smoothness and high success rates in obstacle-dense fields, especially in disaster recovery simulations [8]. Meanwhile, Simulated Annealing (SA) has been refined to improve its convergence speed and global search capacity, with modern versions reducing path complexity by up to 27% in stochastic environments [9]. Finally, heuristic optimization continues to evolve. Real-time path planning based on hybrid algorithms now supports rapid recalculation cycles – down to tens of milliseconds – by integrating motion prediction and adaptive cost maps. These methods are particularly useful for swarm robotics and decentralized navigation tasks [10].

The incorporation of machine learning (ML) into dynamic path planning has profoundly reshaped mobile robot navigation. Unlike traditional rule-based algorithms, ML techniques – particularly reinforcement learning (RL) – have enabled robots to learn optimal paths in real-time by interacting with dynamic environments [11]. This shift is not merely technical; it represents a conceptual leap in how autonomy is defined in robotic systems. As research has shown, Deep Q-Networks (DQN) outperform classical algorithms such as A* and Dijkstra in both computational speed and adaptability to moving obstacles [12]. This superiority is especially evident in non-deterministic

settings, where static methods struggle. In more complex simulations, policy gradient methods have demonstrated increased training stability compared to traditional Q-learning, especially in high-dimensional environments like Gazebo [13]. To address the complexity of real-world input, hybrid models combining CNNs, LSTMs, and reinforcement learning have emerged. These models integrate spatial and temporal data for more nuanced obstacle avoidance and trajectory prediction [14]. Experience Replay, used in DDPG, further refines learning by storing prior interactions, accelerating convergence and improving path efficiency [15]. Notably, CNNs facilitate real-time obstacle recognition using visual input streams, making perception faster and more accurate [16]. However, simulation-to-reality transfer remains problematic – over 40% of models successful in simulation fail in physical trials due to noise and unseen variables [17]. Despite this, ML approaches continue to offer exceptional advantages in adaptability and generalization across environments [18], particularly with the use of Graph Neural Networks for encoding dynamic topologies [19].

The past three years have seen an unprecedented surge in RL and DL applications in robotic navigation. A 28% increase in related publications between 2021 and 2023 highlights this growing interest [11]. Yet, despite the volume of research, comparative studies remain scarce. Most publications focus on isolated models without cross-evaluation, limiting broader applicability [12]. Experimental setups often vary widely, making it difficult to assess algorithms under unified benchmarks [13]. Some prioritize

time-to-goal, others measure collision rates or energy use, creating inconsistencies in reported outcomes [14]. Real-world tests, like those conducted with TurtleBot3 in Gazebo environments, confirm RL models reach targets up to 35% faster with fewer collisions than classical planners [15]. However, such results lack standardization across platforms. Moreover, key scientific reviews point out that current literature is fragmented, with little effort to synthesize experimental results into a cohesive framework [16; 17; 18; 19]. This fragmentation underscores the urgent need for theoretical consolidation to guide practical implementation.

The primary aim of this article is to conduct an in-depth theoretical and analytical review of contemporary machine learning algorithms applied to dynamic path planning in mobile robotics. The study systematically examines scientific models, compares algorithmic efficiency, and synthesizes results from over 40 peer-reviewed sources to identify patterns, limitations, and advancements across reinforcement, supervised, and hybrid learning approaches.

Materials and methods

This study is grounded in the comprehensive analysis of more than 40 peer-reviewed scientific sources published between 2020 and 2024. The literature was drawn from globally recognized academic databases such as Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, Springer, and ScienceDirect. Selection criteria included direct relevance to machine learning-based dynamic path planning, verified methodological rigor,

and the presence of empirical performance data or experimental results.

The research employs a structured analytical framework to review and synthesize findings from published studies on machine learning algorithms in robotic navigation. A combination of descriptive, comparative, and analytical methods was applied to dissect algorithmic design principles, assess performance metrics like adaptability and computational cost, and map scientific contributions across reinforcement, supervised, and hybrid learning models. Each study was evaluated within its methodological context to ensure consistency and depth of interpretation.

Results and their discussion

Reinforcement Learning-Based Approaches in Dynamic Path Planning

Reinforcement learning began with tabular methods like Q-Learning and SARSA, which remain relevant in structured environments with limited state complexity. Q-Learning operates off-policy, updating its state-action values based on the best possible action, not necessarily the one taken. This allows it to converge faster in deterministic settings, where complete observability is present [20]. SARSA, however, updates its estimates based on the actual policy the agent follows, making it more resilient to noise and uncertainty during exploration [21]. In semi-structured environments, where state transitions are stochastic or partially observable, SARSA tends to produce smoother and more cautious trajectories. Yet, it does so at the cost of slower convergence when compared to Q-Learning. Both algorithms become

impractical when the number of states and actions grows, due to the exponential increase in memory and computation – a

problem known as the curse of dimensionality. These foundational differences and constraints are synthesized in Table 1.

Table 1. Comparative Analysis of Q-Learning and SARSA

Parameter	Q-Learning	SARSA
Learning Type	Off-policy	On-policy
Exploration Sensitivity	Less sensitive	More sensitive
Convergence Speed	Faster in deterministic environments	Slower but more stable in stochastic cases
Safety in Risky Domains	Can be unsafe due to over-estimation	Safer; follows current policy
Stability	May diverge with improper exploration	More stable under same conditions
Usage Domain	Suitable for known/structured environments	Better for noisy/semi-structured environments
Scalability	Limited in large state spaces	Also limited; suffers from same constraint

To address scalability limitations, Deep Q-Learning Networks (DQNs) were introduced. These models use deep convolutional architectures to approximate Q-values from high-dimensional inputs, such as raw pixels or LIDAR scans [22]. In navigation tasks involving dynamic obstacles, DQN significantly outperformed classical A* planners, achieving a 24% reduction in collision rate. Still, DQN suffers from over-estimation of action values. Double DQN (DDQN) corrects this by decoupling action selection from evaluation, which improves both convergence and stability in training [23]. Dueling DQN further advances the architecture by separately modeling state-value and advantage functions, helping the agent better evaluate which states matter, even when actions seem irrelevant [24]. The structure of the deep Q-network

pipeline – from visual input to discrete action selection – is illustrated in Figure 1.

Policy optimization approaches offer a robust alternative to value-based methods, especially in environments with continuous action spaces. Proximal Policy Optimization (PPO) is among the most widely adopted due to its clipped objective, which ensures smoother updates and greater training stability [25]. PPO has been successfully deployed in real robots like TurtleBot3, reducing task completion times by up to 40% compared to DQN. A3C (Asynchronous Advantage Actor-Critic) accelerates learning through parallel training threads, with agents operating asynchronously to explore different trajectories. This design not only increases sample efficiency but also helps avoid convergence to suboptimal local minima [26]. In dynamic environments with

moving goals and obstacles, A3C demonstrated 35% faster convergence than DQN. It is particularly suited for multi-agent systems and environments with frequent change, where learning speed and policy generalization are critical. TRPO (Trust Region Policy Optimization) builds on these concepts by strictly bounding policy updates within trust regions. This

mathematical safeguard enhances training stability, especially in long-horizon navigation tasks that demand consistent behavior over extended episodes. Compared to PPO and A3C, TRPO maintains stronger guarantees for monotonic policy improvement, making it a preferred choice in safety-critical scenarios [26].

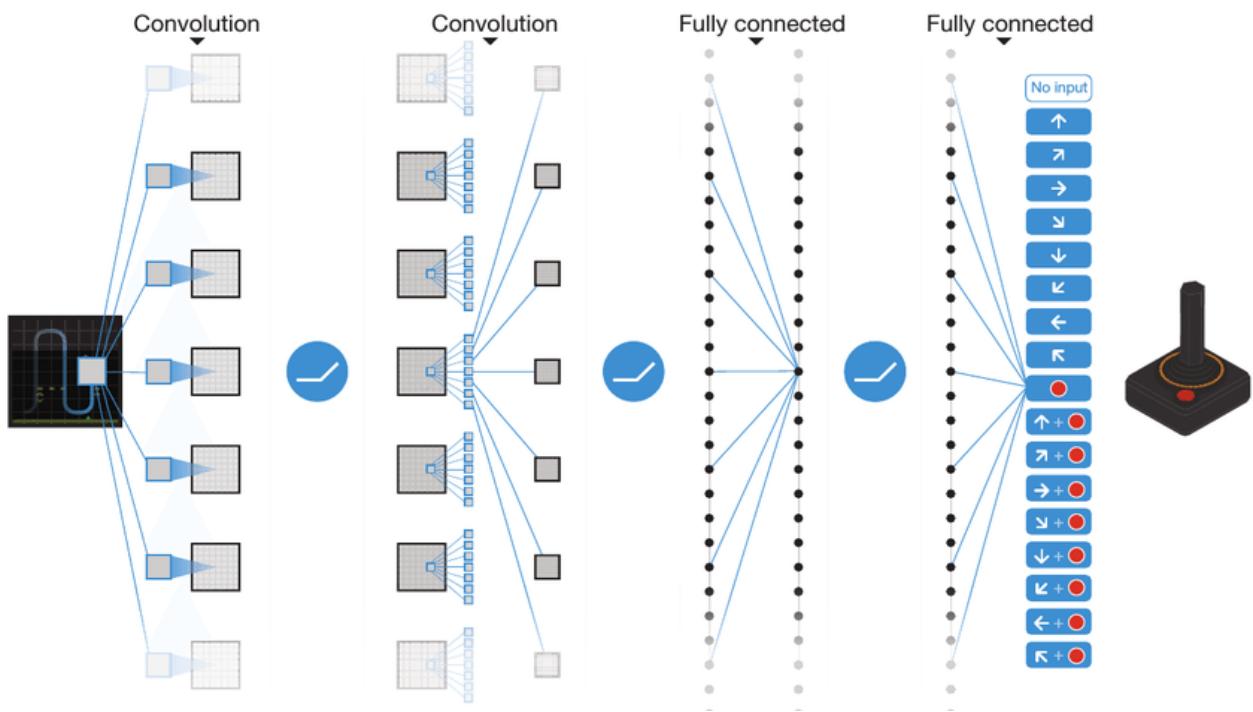


Fig. 1. Architecture of a Deep Q-Network (DQN)

Supervised and Imitation Learning Approaches

Behavioral Cloning (BC) remains one of the most widely used supervised learning strategies in robotic navigation. In BC, the model passively learns a mapping between observations and actions by mimicking an expert's trajectory, collected from human-operated or algorithmically optimal control systems [27]. These demonstrations, usually obtained from simulators like CARLA or real-world

robots, provide sequential data aligned with expert decision-making processes [28]. Despite its simplicity, BC is prone to error accumulation: small deviations in early predictions can cascade into major trajectory failures over time. This phenomenon becomes especially critical in extended episodes, where uncorrected decisions amplify over the planning horizon [29]. To mitigate this, techniques like DAgger have been introduced – these iteratively allow expert corrections to be

integrated into the training dataset, reducing the divergence from desired behavior [30]. The method's generalization capability is inherently limited by the diversity and coverage of expert trajectories. In safe yet structured environments, such as warehouse logistics or traffic lanes, BC models exhibit high short-term accuracy – up to

92% in certain benchmark tests [30]. However, their adaptability to new conditions remains constrained unless supplemented with additional learning strategies, such as reinforcement-based fine-tuning [30]. A comparative overview of BC and broader expert imitation frameworks is presented in Table 2.

Table 2. Comparative Analysis of Behavioral Cloning and Expert Demonstration Learning

Aspect	Behavioral Cloning (BC)	Expert Demonstration Learning
Learning Type	Supervised learning	Supervised or semi-supervised
Input Data	Labeled trajectories of expert actions	Real-time or pre-recorded expert demonstrations
Error Accumulation	High (compounding over long horizons)	Moderate (depending on correction strategies)
Adaptability	Low in unseen environments	Moderate if integrated with online feedback
Training Safety	Safe (no trial-and-error required)	Safe if offline; risk increases with real-time feedback models
Required Demonstrations	High (100 + for complex tasks)	Moderate (50–100)
Real-World Use Cases	Autonomous driving, warehouse navigation	Surgical robotics, service robots
Weaknesses	Overfitting, no correction of out-of-distribution errors	Limited generalization if expert data is sparse

Sequential decision-making in dynamic or partially observable environments necessitates models that can retain and process historical context. Long Short-Term Memory (LSTM) networks, due to their gated memory architecture, excel in such tasks by preserving long-range temporal dependencies between observations and decisions [31]. In contrast, Gated Recurrent Units (GRUs) provide computational efficiency, often yielding similar accuracy while reducing training time by 10–15% in practical navigation systems [32]. RNN-

based architectures are particularly effective in applications where real-time sensor data may be delayed or partially corrupted. Their ability to model temporal context allows agents to predict and compensate for unseen obstacles or state transitions. This is especially critical in autonomous indoor navigation, aerial robotics, and hospital delivery systems [33]. Beyond standard RNNs, sequence-to-sequence (seq2seq) models expand the predictive horizon by generating full sequences of actions based on prior observations, rather than single-

step predictions. In navigation experiments involving dynamic objects and occlusion, seq2seq models reduced trajectory deviation by approximately 30% compared to basic LSTM predictors [33]. These architectures become even more powerful when integrated with attention mechanisms,

which enable the network to focus selectively on critical moments in the input sequence – greatly improving interpretability and precision [34]. A visual breakdown of how LSTM and GRU architectures process temporal input for navigation purposes is shown in Figure 2.

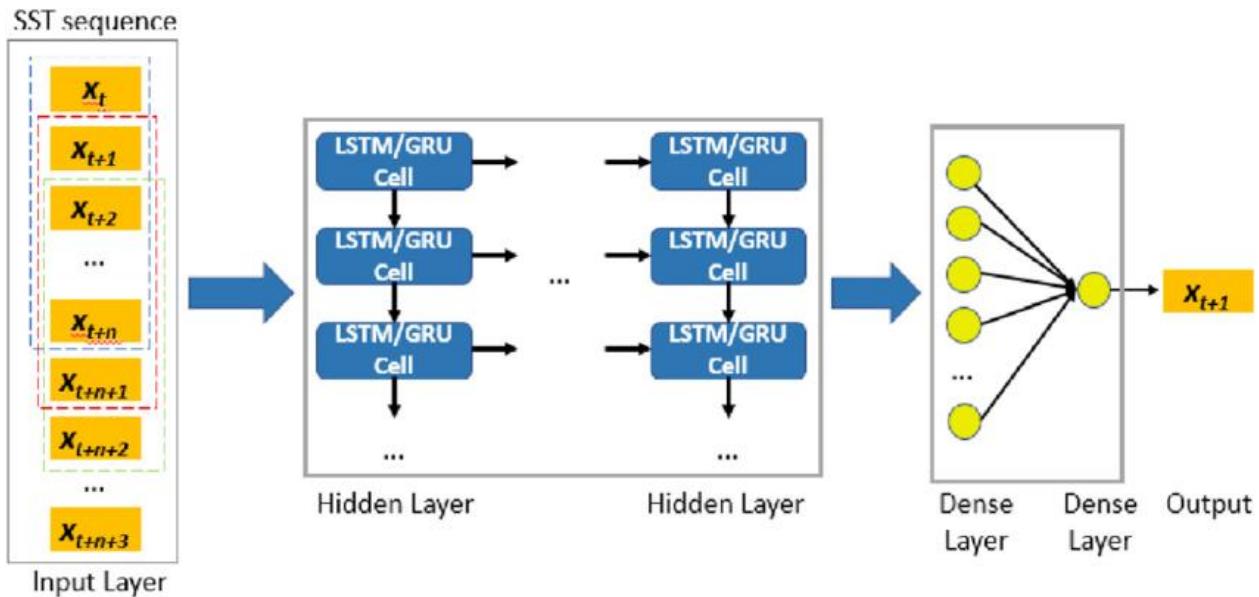


Fig. 2. Architecture of LSTM and GRU Models for Path Prediction Tasks

Hybrid and Graph-Based Learning Architectures

Graph Neural Networks (GNNs) provide a computationally efficient and topologically expressive framework for dynamic path planning. Their ability to encode spatial and relational information across both local neighborhoods and global structures makes them particularly effective in unpredictable and evolving environments [35]. In Dynmp, a GNN-based motion planner tested under shifting obstacle scenarios, agents achieved up to 28% improvement in path continuity compared to baseline DNN models [35]. Beyond static geometry, modern GNN frameworks

incorporate spatio-temporal dependencies to handle changing maps. By continuously updating node embeddings based on neighbor states and temporal sequences, these networks enable mobile agents to react adaptively to obstacle movements or shifting targets [36]. In transportation robotics, such architectures have been successfully applied to urban grid layouts, encoding intersections and street segments as interconnected graph nodes with real-time traffic conditions as edge weights [36]. Stochastic occupancy grid prediction also benefits from graph-based formulations. GNNs enable probabilistic inference over partially observable environments by propagating

information iteratively across a spatial map graph, thus allowing the agent to maintain a stable path despite environmental uncertainty [37]. This approach significantly reduces the computational load, especially in embedded systems where real-time constraints are critical [37].

Hybrid models that merge neural learning with symbolic reasoning are becoming essential in contexts where explainability and constraint satisfaction matter. For example, symbolic abstraction techniques such as reachability analysis can guide hierarchical reinforcement learning, segmenting the environment into interpretable symbolic goals [38]. A robot trained in this manner does not merely optimize navigation but understands transitions between semantically meaningful states like "exit room" or "avoid hazard" [38]. The value of hybridization becomes most apparent in real-time semantic navigation. In recent experiments using vision-based neuro-symbolic pipelines, agents were able to parse visual data, interpret semantic labels, and align actions with symbolic goals, even under changing indoor layouts [39]. These systems integrated CNN perception modules with symbolic planners in a feedback loop that enabled both correction and generalization of behavior [39]. Importantly, this dual-channel architecture – where neural models propose and symbolic systems validate – supports task reliability in uncertain domains. It ensures that emergent behaviors remain within operational constraints and goal semantics, which is

especially crucial in applications involving human interaction, such as eldercare or collaborative manufacturing.

Conclusions

This article presents a detailed analytical synthesis of machine learning algorithms used in dynamic path planning for mobile robots. Through the structured examination of over 40 peer-reviewed scientific works, the study identifies the evolution and differentiation of learning paradigms – reinforcement learning, supervised models, and hybrid frameworks. Q-Learning and SARSA offer foundational insights into value-based strategies, whereas their deep learning extensions (DQN, DDQN, Dueling DQN) enhance scalability and robustness in high-dimensional state spaces. Policy optimization models such as PPO, A3C, and TRPO demonstrate superior adaptability in continuous action domains and dynamic environments. Supervised techniques, particularly Behavioral Cloning and seq2seq models, underscore the value of expert demonstrations, though they remain vulnerable to compounding errors. Meanwhile, recurrent architectures like LSTM and GRU handle partial observability with temporal memory capabilities. The emergence of Graph Neural Networks and neuro-symbolic systems introduces a new layer of abstraction and interpretability, essential for real-world deployment under uncertainty. These findings form a theoretical framework that aligns algorithmic selection with task-specific constraints in modern robotic navigation.

References

1. Li X., Zikry A.H.A., Hassan A.Y., Shaban W.I., Abdel-Momen S.F. Dynamic path planning of mobile robots using adaptive dynamic programming. *Expert Systems with Applications*. 2024;235:121112. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121112>
2. Hou J., Wang J., Li P. Dynamic path planning for mobile robots by integrating improved sparrow search algorithm and dynamic window approach. *Actuators*. 2024;13(1):24. <https://doi.org/10.3390/act13010024>
3. Yang L., Bi J., Yuan H. Dynamic path planning for mobile robots with deep reinforcement learning. *IFAC-PapersOnLine*. 2022;55(11):19–24. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.004>
4. Hewawasam H.S., Ibrahim M.Y., Appuhamillage G.K. Past, present and future of path-planning algorithms for mobile robot navigation in dynamic environments. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*. 2022;3:353–365.
5. Marashian A., Razminia A. Mobile robot's path-planning and path-tracking in static and dynamic environments: Dynamic programming approach. *Robotics and Autonomous Systems*. 2024;172:104592. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104592>
6. Liu L., Wang Y., Chen J. Path planning techniques for mobile robots: Review and prospect. *Expert Systems with Applications*. 2023;227:120254. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120254>
7. Sánchez-Ibáñez J.R., Pérez-del-Pulgar C.J., García-Cerezo A. Path planning for autonomous mobile robots: A review. *Sensors*. 2021;21(23):7898. <https://doi.org/10.3390/s21237898>
8. Lu Y., Da C. Global and local path planning of robots combining ACO and dynamic window algorithm. *Scientific Reports*. 2025;15(1):9452.
9. Shi K., Zhang J., He M. Dynamic path planning of mobile robot based on improved simulated annealing algorithm. *Journal of the Franklin Institute*. 2023;360(6):4378–4398. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2023.02.012>
10. Wu Q., Liu F., Zhao Y. Real-time dynamic path planning of mobile robots: A novel hybrid heuristic optimization algorithm. *Sensors*. 2019;20(1):188. <https://doi.org/10.3390/s20010188>
11. Zhu K., Zhang T. Deep reinforcement learning based mobile robot navigation: A review. *Tsinghua Science and Technology*. 2021;26(5):674–691.
12. Mannan A., Rahman S., Akhtaruzzaman M. Classical versus reinforcement learning algorithms for unmanned aerial vehicle network communication and coverage path planning: A systematic literature review. *International Journal of Communication Systems*. 2023;36(5):e5423.
13. Tang Y., Ma J., Zhang Z. Perception and navigation in autonomous systems in the era of learning: A survey. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2022;34(12):9604–9624.
14. Kiran B.R., Sobh I., Talpaert V., Mannion P., Al Sallab A., Yogamani S., Pérez P. Deep reinforcement learning for autonomous driving: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021;23(6):4909–4926.
15. Tai L., Paolo G., Liu M. Virtual-to-real deep reinforcement learning: Continuous control of mobile robots for mapless navigation. In: *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE; 2017. P. 31–36.

16. Rudenko A., Palmieri L., Arras K.O. Predictive planning for a mobile robot in human environments. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Workshop on AI Planning and Robotics*. 2017.
17. Han D., Gu J., Cheng X. A survey on deep reinforcement learning algorithms for robotic manipulation. *Sensors*. 2023;23(7):3762.
18. Hachour O. Path planning of autonomous mobile robot. *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*. 2008;2(4):178–190.
19. Kaluđer H., Brezak M., Petrović I. A visibility graph based method for path planning in dynamic environments. In: *2011 Proceedings of the 34th International Convention MIPRO*. IEEE; 2011. P. 717–721.
20. Mnih V., Kavukcuoglu K., Silver D., Rusu A.A., Veness J., Bellemare M.G., et al. Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*. 2015;518(7540):529–533.
21. Carta S., Corriga G., Recupero D.R., Saia R., Satta R. Multi-DQN: An ensemble of Deep Q-learning agents for stock market forecasting. *Expert Systems with Applications*. 2021;164:113820.
22. Gu Y., He H., Ni Y. Proximal policy optimization with policy feedback. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2021;52(7):4600–4610.
23. Xiao Y., Tan W., Amato C. Asynchronous actor-critic for multi-agent reinforcement learning. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2022;35:4385–4400.
24. Li H., He H. Multiagent trust region policy optimization. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2023;35(9):12873–128878.
25. Sigaud O. Combining evolution and deep reinforcement learning for policy search: A survey. *ACM Transactions on Evolutionary Learning*. 2023;3(3):1–20.
26. Li S.E. Deep reinforcement learning. In: *Reinforcement Learning for Sequential Decision and Optimal Control*. Singapore: Springer Nature Singapore; 2023. P. 365–402.
27. Eraqi H.M., Moustafa M.N., Honer J. Dynamic conditional imitation learning for autonomous driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022;23(12):22988–23001.
28. Duan A., Liu B., Zhang J. A structured prediction approach for robot imitation learning. *The International Journal of Robotics Research*. 2024;43(2):113–133.
29. Le Mero L., Singh R., Tran L., El Asri L., Zhang Y. A survey on imitation learning techniques for end-to-end autonomous vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022;23(9):14128–14147.
30. Fang Q., Li S., Wang X., Li W. Target-driven visual navigation in indoor scenes using reinforcement learning and imitation learning. *CAAI Transactions on Intelligence Technology*. 2022;7(2):167–176.
31. Lee Z.E., Zhang K.M. Generalized reinforcement learning for building control using Behavioral Cloning. *Applied Energy*. 2021;304:117602.
32. Zeng A., Song S., Lee J., Rodriguez A., Funkhouser T. Transporter networks: Rearranging the visual world for robotic manipulation. In: *Conference on Robot Learning*. PMLR; 2021. P. 726–747. URL: <https://arxiv.org/abs/2010.14406> (accessed 17.03.2025).

33. Pan W., Lv B., Peng L. Research on AUV navigation state prediction method using multihead attention mechanism in a CNN-BiLSTM model. In: *Seventh International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers, and Software Engineering (AEMCSE 2024)*. Vol. 13229. SPIE; 2024. P. 831–840.
34. Molina-Leal A., Martinez-Rodrigo A., Cuenca-Asensi S., Campoy P. Trajectory planning for a mobile robot in a dynamic environment using an LSTM neural network. *Applied Sciences*. 2021;11(22):10689.
35. Zhang W., Li Y., Li H., Yu J. Dyngmp: Graph neural network-based motion planning in unpredictable dynamic environments. In: *2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE; 2023. P. 858–865.
36. Wei W., Sun Y., Zhang Y., Wang H., Li S. Guest Editorial Introduction to the Special Issue on Graph-Based Machine Learning for Intelligent Transportation Systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2023;24(8):8393–8398.
37. Xie Z., Dames P. Stochastic occupancy grid map prediction in dynamic scenes. In: *Conference on Robot Learning*. PMLR; 2023. P. 1686–1705.
38. Zadem M. Automatic Symbolic Goal Abstraction via Reachability Analysis in Hierarchical Reinforcement Learning. Institut Polytechnique de Paris; 2024.
39. Alotaibi A., Ahmad M., Rahman A., Alrashidi A. Deep Learning-Based Vision Systems for Robot Semantic Navigation: An Experimental Study. *Technologies*. 2024;12(9):157.

Информация об авторах / Information about the Authors

Aigerim B. Kaimakova, Undergraduate of the Department of Information Technologies, Kazakh-British Technical University, Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: ai_kaimakova@kbtu.kz, ORCID: 0009-0006-2486-9175

Айгерим Бекбулатқызы Каймакова, магистрант кафедры информационных технологий, Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Республика Казахстан, e-mail: ai_kaimakova@kbtu.kz, ORCID: 0009-0006-2486-9175

Zhomart U. Aldamuratov, Master of Computer Science, Senior Lecturer, Kazakh-British Technical University, Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: z.aldamuratov@kbtu.kz

Жомарт Утегенович Алдамуратов, магистр компьютерных наук, старший преподаватель, Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Республика Казахстан, e-mail: z.aldamuratov@kbtu.kz

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-79-92>



УДК 621.396

Особенности представления сигналов в малобазовой поляризационной измерительной системе

И. Е. Мухин¹, А. Н. Попов¹, А. В. Хмелевская²✉, И. И. Олейник³

¹АО «Авиавтоматика» имени В. В. Тарасова»
ул. Запольная, д. 47, г. Курск 305040, Российская Федерация

²Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

³Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, д. 85, г. Белгород 308015, Российская Федерация

✉ e-mail: aquarel85@mail.ru

Резюме

Цель исследования – анализ особенностей представления сигналов в малобазовой поляризационной измерительной системе.

Методы. Использовались методы теории вероятностей, математической статистики, статистической радиотехники, вычислительной математики, конструктивные особенности малобазовой поляризационной измерительной системы. Полученные уравнения позволяют вычислить выходные напряжения для приемных антенн обеих позиций. Соотношения справедливы при условии идентичности конструкций обеих позиций, включающих антенну для одновременного приёма и передачи сигналов одной линейной поляризации, а также соответствующее приёмо-передающее оборудование. Для сигналов с горизонтальной и вертикальной поляризацией, ортогональных друг другу по отношению к первой позиции, установлены собственные уникальные свойства, зависящие от ориентации и характера используемых поляризаций. Разработан алгоритм расчета фазовых сдвигов отраженных сигналов для антенн малобазовой поляризационной измерительной системы, который применим для горизонтальной и вертикальной поляризации.

Результаты: обоснована независимость значения амплитуды принимаемой волны отраженных сигналов от особенности конструкции малобазовой поляризационной измерительной системы; установлена зависимость энергетических показателей принимаемых сигналов от эффективной поверхности рассеяния объекта (величины $\sigma_{\text{B},\text{B}}$, $\sigma_{\text{B},\text{G}}$, $\sigma_{\text{G},\text{B}}$, $\sigma_{\text{G},\text{G}}$) для горизонтальной и вертикальной поляризации; сформулирован алгоритм расчета фазовых сдвигов отраженных сигналов для антенн малобазовой поляризационной измерительной системы; исследованы факторы влияния технических характеристик оборудования малобазовой поляризационной измерительной системы на энергетические показатели принимаемых сигналов.

Заключение. Предложена методика расчета фазового центра малобазовой поляризационной измерительной системы, позволяющая реализовать внутреннюю задачу теории антенных систем, а также выбрать произвольную точку в качестве центра координат малой базы поляризационной измерительной системы. Эта точка может находиться внутри зоны покрытия базы В, включая даже положение центров антенн отдельных позиций. Подобный подход расширяет гибкость системы и улучшает точность вычисления фазовых характеристик, обеспечивая универсальность метода независимо от конкретной физической реализации антенн и взаимного расположения компонентов системы.

Ключевые слова: эффективная поверхность рассеяния; малобазовая поляризационная измерительная система; антenna; горизонтальная поляризация; вертикальная поляризация; фазовый центр; сигнал.

© Мухин И. Е., Попов А. Н., Хмелевская А. В., Олейник И. И., 2025

Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering,
Information Science. Medical Instruments Engineering. 2025;15(3):79–92

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

Для цитирования: Особенности представления сигналов в малобазовой поляризационной измерительной системе / И. Е. Мухин, А. Н. Попов, А. В. Хмелевская, И. И. Олейник // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 3. С. 79–92. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-79-92>

Поступила в редакцию 11.07.2025

Подписана в печать 10.08.2025

Опубликована 30.09.2025

Features of signal representation in a low-phase polarization measuring system

Ivan E. Mukhin¹, Alexander N. Popov¹,
Alena V. Khmelevskaya²✉, Ivan I. Oleynik³

¹ JSC "Aviaautomatics" named after V.V. Tarasov"
47 Zapolnaya Str., Kursk 305040, Russian Federation

² Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

³ Belgorod State National Research University
85 Pobedy Str., Belgorod 308015, Russian Federation

✉ e-mail: quarel85@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is analysis of key features of signal representation in a small-base polarization measuring system.

Methods. The methods of probability theory, mathematical statistics, statistical radio engineering and computational mathematics were used in the scientific research. The design features of the small-base polarization measuring system were taken into account. As a result, a number of equations were obtained that allow calculating the output voltages for the receiving antennas of both positions. These relationships are valid in the case when the designs of both positions are similar and include an antenna for receiving and transmitting signals of the same linear polarization and a transceiver. For emitted and received signals of horizontal and vertical polarization, orthogonal to the polarization of the first position, their inherent features are determined. The studies made it possible to formulate an algorithm for calculating the phase shifts of reflected signals for antennas of the small-base polarization measuring system. The proposed algorithm is valid for horizontal and vertical polarization.

Results: the independence of the received wave amplitude value of reflected signals from the design feature of the small-base polarization measuring system was substantiated; the dependence of the energy indicators of received signals on the effective scattering surface of the object (the values $\sigma_{v,v}$, $\sigma_{v,g}$, $\sigma_{g,v}$, $\sigma_{g,g}$) for horizontal and vertical polarization was established; an algorithm for calculating the phase shifts of reflected signals for antennas of the small-base polarization measuring system was formulated; the factors influencing the technical characteristics of the equipment of the small-base polarization measuring system on the energy indicators of received signals were investigated.

Conclusion. The scientific article proposes a method for calculating the phases of the phase center of the small-base polarization measuring system, which allows implementing the internal problem of the theory of antenna systems. The proposed method allows tying the phase center of the small-base polarization measuring system to an arbitrary conditional point within the base, including the centers of the antennas of any of the two positions.

Keywords: effective scattering surface; small-base polarization measuring system; antenna; horizontal polarization; vertical polarization; phase center; signal.

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

For citation: Mukhin I.E., Popov A.N., Khmelevskaya A.V., Oleynik I.I. Features of signal representation in a low-phase polarization measuring system. *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(3):79–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-79-92>

Received 11.07.2025

Accepted 10.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

Конструктивные особенности малобазовой поляризационной измерительной системы заключаются в следующем:

– передающая позиция. Передатчик оснащён активной фазированной антенной решёткой (АФАР), которая способна генерировать два типа сигналов – с вертикальной и горизонтальной поляризацией. Эти сигналы передаются к объекту исследования и взаимодействуют с ним, изменяя своё направление распространения и характеристики амплитудно-фазовых колебаний;

– приёмные позиции. Существуют две приёмные позиции, каждая из которых оборудована индивидуальной антенной системой и приёмником, настроенными на фиксированные типы поляризации. Первая приёмная позиция воспринимает сигнал с вертикальной поляризацией, а вторая – с горизонтальной. При этом важно, что расстояние между этими двумя точками существенно меньше размеров зон отражения сигналов, что обеспечивает плоскость фронта принимаемых сигналов и повышает точность измерений. Это позволяет на

каждую из позиций обеспечить прием сигнала, отраженного от одного и того же объекта [1].

Материалы и методы

В малобазовой поляризационной измерительной системе рассмотрим сигнал с вертикальной поляризацией с ортом поляризации (\vec{e}_B). Антenna передающего устройства расположена от объекта на расстоянии r_2 и обладает следующими характеристиками: мощность ($P_{A_{\text{пер.в}}}$), максимальный коэффициент усиления на передачу ($G_{A_{\text{пер.в}}}(\vec{R})$) и на прием ($G_{A_{\text{пр.в}}}(\vec{R})$) в направлении на объект. Принимаем во внимание фазовые смещения в передающем ($\Delta \varphi_{\text{пер.в}}$) и приемном ($\Delta \varphi_{\text{пр.в}}$) тракте.

Описываемый сигнал характеризуется длиной волны λ и соответствующим волновым числом $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Временная форма сигнала задаётся видом комплексной огибающей $\dot{T}_{\text{пер.в}}(t)$.

Представление сигнала в виде вектора напряжённости электромагнитного поля имеет следующий вид [2]:

$$\dot{\vec{E}}_B(t, R) = \sqrt{60P_{A_{\text{неп.в}}} G_{A_{\text{неп.в}}}(\vec{R})} \frac{1}{r_2} e^{-jkr_2} e^{j\Delta\phi_{\text{неп.в}}} \dot{T}_{\text{неп.в}}(t) \vec{e}_B. \quad (1)$$

Данное представление детально описывает распространение вертикально поляризованных сигналов в пространстве с учётом всех значимых факторов, влияющих на их амплитуду и фазу.

Проанализируем далее поведение отражённого от объекта сигнала с

вертикальной поляризацией. На него оказывают влияние эффективные поверхности рассеяния объекта на вертикальной ($\sigma_{B,B}$) и горизонтальной ($\sigma_{B,G}$) поляризации.

На основании соотношения (1) представим данный сигнал в следующем виде [3]:

$$\dot{\vec{E}}_{B0}(t, R) = \sqrt{60P_{A_{\text{неп.в}}} G_{A_{\text{неп.в}}}(\vec{R})} \frac{1}{r_2} e^{-jkr_2} e^{j\Delta\phi_{\text{неп.в}}} \dot{T}_{\text{неп.в}}(t). \quad (2)$$

Приемный канал вертикальной поляризации описывается напряжением собственных шумов ($\dot{U}_{\text{ш.в}}(t)$), коэф-

фициентом усиления ($K_{\text{пр.в}}$). Напряжение на выходе канала можно описать соотношением

$$\begin{aligned} \dot{U}_{B,B}(t, R) \approx K_{\text{пр.в}} \sqrt{G_{A_{\text{пр.в}}}(\vec{R}) G_{A_{\text{неп.в}}}(\vec{R}) P_{A_{\text{неп.в}}}} \frac{1}{r_2 r_2} e^{-jk(r_2+r_2)} e^{j\Delta\phi_{\text{неп.в}}} e^{j\Delta\phi_{\text{пр.в}}} \times \\ \times \dot{T}_{\text{неп.в}}(t) \sigma_{B,B} + \dot{U}_{\text{ш.в}}(t). \end{aligned} \quad (3)$$

Приемный канал горизонтальной поляризации описывается напряжением собственных шумов ($\dot{U}_{\text{ш.г}}(t)$), коэффициентом усиления ($K_{\text{пр.г}}$).

$$\begin{aligned} \dot{U}_{B,G}(t, R) \approx K_{\text{пр.г}} \sqrt{G_{A_{\text{пр.г}}}(\vec{R}) G_{A_{\text{неп.в}}}(\vec{R}) P_{A_{\text{неп.в}}}} \frac{1}{r_1 r_2} e^{-jk(r_1+r_2)} e^{j\Delta\phi_{\text{неп.в}}} e^{j\Delta\phi_{\text{пр.г}}} \times \\ \times \dot{T}_{\text{неп.в}}(t) \sigma_{B,G} + \dot{U}_{\text{ш.г}}(t). \end{aligned} \quad (4)$$

Рассмотрим сигнал с горизонтальной поляризацией, характеризующийся орт-вектором поляризации (\vec{e}_g). Данный сигнал излучается антенной передающего устройства с мощностью ($P_{A_{\text{пер.г}}}$), расположенной на расстоянии r_1 от объекта. Максимальный коэффициент усиления антенны в направлении на объект составляет на передачу ($G_{A_{\text{пер.г}}}(\vec{R})$) и на прием ($G_{A_{\text{пр.г}}}(\vec{R})$). Принимаем во

внимание набег фазы в трактах передающего ($\Delta\phi_{\text{пер.г}}$) и приемного ($\Delta\phi_{\text{пр.г}}$) устройств.

Данный сигнал описывается длиной волны λ и, соответственно, волновым числом $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Временная форма сигнала задаётся видом комплексной огибающей $\dot{T}_{\text{пер.г}}(t)$.

Излученный сигнал можно представить в следующем виде [4]:

$$\dot{\vec{E}}_r(t, R) = \sqrt{60P_{A_{\text{пер.}r}}G_{A_{\text{пер.}r}}(\vec{R})} \frac{1}{r_1} e^{-jkr_1} e^{j\Delta\varphi_{\text{пер.}r}} \dot{T}_{\text{пер.}r}(t) \vec{e}_r \cdot \dot{T}_{\text{пер.}r}(t) \sigma_{r,v} + \dot{U}_{\text{ш.}v}(t). \quad (5)$$

Рассмотрим подробно поведение сигнала горизонтальной поляризации, отражённого от объекта. Основное влияние на этот сигнал оказывают величины эффективных площадей рассеяния (ЭПР) объекта на соответствующих

$$\dot{\vec{E}}_{r0}(t, R) = \sqrt{60P_{A_{\text{пер.}r}}G_{A_{\text{пер.}r}}(\vec{R})} \frac{1}{r_1} e^{-jkr_1} e^{j\Delta\varphi_{\text{пер.}r}} \dot{T}_{\text{пер.}r}(t) \begin{pmatrix} \sigma_{r,v} \\ \sigma_{r,g} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Приёмный канал вертикальной поляризации характеризуется собственным уровнем шума, выраженным напряжением собственных шумов ($\dot{U}_{\text{ш.}v}(t)$), и

$$\dot{U}_{r,v}(t, R) \approx K_{\text{пр.}v} \sqrt{G_{A_{\text{пр.}v}}(\vec{R}) G_{A_{\text{пер.}r}}(\vec{R}) P_{A_{\text{пер.}r}}} \frac{1}{r_1 r_2} e^{-jk(r_1+r_2)} e^{j\Delta\varphi_{\text{пер.}r}} e^{j\Delta\varphi_{\text{пр.}v}} \times \dot{T}_{\text{пер.}r}(t) \sigma_{r,v} + \dot{U}_{\text{ш.}v}(t). \quad (7)$$

Приемный канал горизонтальной поляризации описывается напряжением собственных шумов ($\dot{U}_{\text{ш.}g}(t)$), коэффициентом усиления ($K_{\text{пр.}g}$). [2].

$$\dot{U}_{r,g}(t, R) \approx K_{\text{пр.}g} \sqrt{G_{A_{\text{пр.}g}}(\vec{R}) G_{A_{\text{пер.}r}}(\vec{R}) P_{A_{\text{пер.}r}}} \frac{1}{r_1 r_1} e^{-jk(r_1+r_1)} e^{j\Delta\varphi_{\text{пер.}r}} e^{j\Delta\varphi_{\text{пр.}g}} \times \dot{T}_{\text{пер.}r}(t) \sigma_{r,g} + \dot{U}_{\text{ш.}g}(t). \quad (8)$$

Конструктивные особенности малобазовых поляризационные измерительных систем позволяют обосновать следующие ограничения и приближения.

Рассмотрим условие равенства дальностей распространения сигналов $R \approx r_1 \approx r_2$ [5]. Расстояние между двумя позициями В существенно меньше самих дистанций ($B \ll R$). Данное

поляризациях (вертикальной ($\sigma_{r,v}$) и горизонтальной ($\sigma_{r,g}$)).

На основании соотношения (5) представим данный сигнал в следующем виде [4]

коэффициентом усиления приёмного тракта ($K_{\text{пр.}v}$). Напряжение на выходе канала можно описать соотношением

Напряжение на выходе канала представлено аналогично соотношению (7):

предположение обосновано следующим образом: размеры дистанции в реальных условиях достигают нескольких километров, тогда как межпозиционная база составляет всего лишь десятки метров. Из-за столь значительной разницы указанных величин изменения фазы и амплитуды приходящего сигнала оказываются пренебрежимо малыми.

Влияние разности путей на величину амплитуды отраженного сигнала становится несущественным, что позволяет упростить выражение для расчета амплитудного множителя. Таким образом, справедливо соотношение [6]:

$$\frac{1}{R^2} \approx \frac{1}{r_1^2} \approx \frac{1}{r_2^2} \approx \frac{1}{r_1 r_2}. \quad (9)$$

В случае фазовых множителей имеет место принципиальное отличие.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda},$$

где k – волновое число; λ – длина волны.

Начало фазы относительно фазового центра О (общий набег фаз) выражается формулой [7]

$$\Psi = 2 \cdot k \cdot R. \quad (10)$$

Используя формулу Эйлера, экспоненциальные множители $e^{-jk(r_1+r_2)}$ могут быть преобразованы:

$$\exp(-j2kR) = \exp(-j\Psi). \quad (11)$$

Это означает, что фаза сигнала изменяется пропорционально сумме расстояний от фазового центра до каждой точки траектории распространения:

Для расстояний получим следующие соотношения:

$$\begin{aligned} r_1 &= R - \Delta r_1, \quad \Delta r_1 = \rho_1 \sin \alpha, \\ r_2 &= R + \Delta r_2, \quad \Delta r_2 = \rho_2 \sin \alpha. \end{aligned} \quad (12)$$

Следовательно, принимая во внимание, что \vec{r}_1, \vec{r}_2 – радиус-векторы положения антенн относительно условного фазового центра О, соотношения (11) примут следующий вид [8]:

$$\begin{aligned} -k2r_1 &= -k2R + k2\rho_1 \sin \alpha, \\ -k(r_1 + r_2) &= -k2R - k \sin \alpha (\rho_2 - \rho_1), \end{aligned} \quad (13)$$

В результате для антенн обеих позиций начало фазы для отраженных сигналов может быть выражено как:

$$\Psi_{rr} = -k \cdot 2\rho_1 \sin \alpha, \quad (14)$$

$$\Psi_{rb} = -k \cdot \sin \alpha \cdot (\rho_2 - \rho_1), \quad (15)$$

$$\Psi_{br} = k \cdot \sin \alpha \cdot (\rho_2 - \rho_1), \quad (16)$$

$$\Psi_{bb} = k \cdot 2\rho_2 \sin \alpha. \quad (17)$$

В выражениях (1–8) присутствуют фазовые множители: $\Delta\phi_{per,r}$, $\Delta\phi_{per,b}$, $\Delta\phi_{pr,r}$, $\Delta\phi_{pr,b}$, определяющие начальную фазу сигналов в передающих и приёмных каналах системы. Рассмотрение этих величин вариируется в зависимости от используемой схемы синхронизации между элементами системы.

Например, в случае использования единого задающего генератора, гарантирующего высокую степень синхронизации между всеми элементами системы, данные фазовые различия становятся незначительными и могут быть игнорированы. Такой подход широко применяется в современных измерительных и радиолокационных комплексах, где точное управление начальной фазой является критически важным фактором, позволяющим повысить качество и точность регистрации и обработки сигналов [9].

Исходя из вышесказанного можно ввести обозначения:

$$Z_{\text{г.г}} = K_{\text{пр.г}} \frac{1}{r_1^2} \sqrt{G_{A_{\text{пр.г}}}(\vec{R}) \cdot G_{A_{\text{пер.г}}}(\vec{R}) \cdot P_{A_{\text{пер.г}}}}, \quad (18)$$

$$Z_{\text{г.в}} = K_{\text{пр.в}} \frac{1}{r_1 r_2} \sqrt{G_{A_{\text{пр.в}}}(\vec{R}) \cdot G_{A_{\text{пер.г}}}(\vec{R}) \cdot P_{A_{\text{пер.г}}}}, \quad (19)$$

$$Z_{\text{в.г}} = K_{\text{пр.г}} \frac{1}{r_1 r_2} \sqrt{G_{A_{\text{пр.г}}}(\vec{R}) \cdot G_{A_{\text{пер.в}}}(\vec{R}) \cdot P_{A_{\text{пер.в}}}}, \quad (20)$$

$$Z_{\text{в.в}} = K_{\text{пр.в}} \frac{1}{r_2^2} \sqrt{G_{A_{\text{пр.в}}}(\vec{R}) \cdot G_{A_{\text{пер.в}}}(\vec{R}) \cdot P_{A_{\text{пер.в}}}}. \quad (21)$$

Следует принять во внимание, что приемная и передающая антенны совмещены, т. е. на обеих позициях используются по одной антенне. Таким образом, для коэффициента усиления антенн можно получить соотношения [10]:

$$\begin{aligned} G_{A_{\text{г}}} &= G_{A_{\text{пр.г}}} = G_{A_{\text{пер.г}}}, \\ G_{A_{\text{в}}} &= G_{A_{\text{пр.в}}} = G_{A_{\text{пер.в}}}. \end{aligned} \quad (22)$$

Антенны первой и второй позиций имеют комплексные нормированные диаграммы направленности первой $F_1(Q)$ и $F_2(Q)$ соответственно. Данные значения можно подставить в (22), тогда получим следующие соотношения [11]:

$$G_{A_{\text{г}}} = G_{\max A_{\text{г}}} \cdot |F_1(Q)|^2,$$

$$\dot{U}_{\text{г.г}}(t, R) = Z_{\text{г.г}} \exp(-j\Psi_{\text{г.г}}) \dot{T}_{\text{пер.г}}(t) \sigma_{\text{г.г}} + \dot{U}_{\text{ш.г}}(t), \quad (26)$$

$$\dot{U}_{\text{г.в}}(t, R) = Z_{\text{г.в}} \exp(-j\Psi_{\text{г.в}}) \dot{T}_{\text{пер.г}}(t) \sigma_{\text{г.в}} + \dot{U}_{\text{ш.в}}(t), \quad (27)$$

$$\dot{U}_{\text{в.г}}(t, R) = Z_{\text{в.г}} \exp(-j\Psi_{\text{в.г}}) \dot{T}_{\text{пер.в}}(t) \sigma_{\text{в.г}} + \dot{U}_{\text{ш.г}}(t), \quad (28)$$

$$\dot{U}_{\text{в.в}}(t, R) = Z_{\text{в.в}} \exp(-j\Psi_{\text{в.в}}) \dot{T}_{\text{пер.в}}(t) \sigma_{\text{в.в}} + \dot{U}_{\text{ш.в}}(t). \quad (29)$$

Для обеспечения правильного функционирования процесса передачи и приёма сигналов малобазовой поляризационной измерительной системы

$$G_{A_{\text{в}}} = G_{\max A_{\text{в}}} \cdot |F_2(Q)|^2. \quad (23)$$

В этом случае соотношения (18–21) примут вид:

$$Z_{\text{г.г}} = K_{\text{пр.г}} \frac{1}{R^2} \sqrt{G_{A_{\text{г}}}^2(\vec{R}) \cdot P_{A_{\text{пер.г}}}},$$

$$Z_{\text{г.в}} = K_{\text{пр.в}} \frac{1}{R^2} \sqrt{G_{A_{\text{в}}}^2(\vec{R}) \cdot P_{A_{\text{пер.г}}}}. \quad (24)$$

$$Z_{\text{в.в}} = K_{\text{пр.в}} \frac{1}{R^2} \sqrt{G_{A_{\text{в}}}^2(\vec{R}) \cdot P_{A_{\text{пер.в}}}},$$

$$Z_{\text{в.г}} = K_{\text{пр.г}} \frac{1}{R^2} \sqrt{G_{A_{\text{г}}}^2(\vec{R}) \cdot G_{A_{\text{в}}}(\vec{R}) \cdot P_{A_{\text{пер.в}}}}. \quad (25)$$

Принимая во внимание соотношения (22–25), напряжения на выходе приемных каналов можно представить в следующем виде:

$$\dot{U}_{\text{г.г}}(t, R) = Z_{\text{г.г}} \exp(-j\Psi_{\text{г.г}}) \dot{T}_{\text{пер.г}}(t) \sigma_{\text{г.г}} + \dot{U}_{\text{ш.г}}(t), \quad (26)$$

$$\dot{U}_{\text{г.в}}(t, R) = Z_{\text{г.в}} \exp(-j\Psi_{\text{г.в}}) \dot{T}_{\text{пер.г}}(t) \sigma_{\text{г.в}} + \dot{U}_{\text{ш.в}}(t), \quad (27)$$

$$\dot{U}_{\text{в.г}}(t, R) = Z_{\text{в.г}} \exp(-j\Psi_{\text{в.г}}) \dot{T}_{\text{пер.в}}(t) \sigma_{\text{в.г}} + \dot{U}_{\text{ш.г}}(t), \quad (28)$$

$$\dot{U}_{\text{в.в}}(t, R) = Z_{\text{в.в}} \exp(-j\Psi_{\text{в.в}}) \dot{T}_{\text{пер.в}}(t) \sigma_{\text{в.в}} + \dot{U}_{\text{ш.в}}(t). \quad (29)$$

комплексные множители, определяющие форму модулированного сигнала [12], должны соответствовать следующим требованиям:

$$\dot{T}_{\text{пер.в}}(t) = \dot{T}_{\text{пер.г}}(t) = \dot{T}(t),$$

$$\dot{T}(t) \cdot \dot{T}^*(t - \tau) = \begin{cases} 1 & \text{при } \tau = 0, \\ \ll 1 & \text{при } \tau \neq 0, \end{cases} \quad (30)$$

т. е. выражения (26–30) корректны [13] при $\tau = 0$.

Результаты и их обсуждение

В работе получены соотношения (26–29), устанавливающие связь между напряжением на выходе приёмных каналов малобазовой поляризационной измерительной системы и физическими процессами, происходящими при передаче и приёме сигналов.

1. Независимость амплитуды от структуры системы. Амплитуда отражённых сигналов практически не зависит от геометрии размещения элементов МПИС [14]. Это обусловлено значительным различием масштабов: расстояния в системе измеряются километрами, в то время как база системы В ограничена метрами ($B \ll R$). Разница между путями прохождения волн Δr_1 и Δr_2 незначительна относительно общего пути R , вследствие чего её влиянием на амплитуду можно пренебречь [14].

2. Определение энергетической составляющей сигнала. Значительная роль отводится эффективным поверхностям рассеивания (величины $\sigma_{\text{в.в}}$, $\sigma_{\text{в.г}}$, $\sigma_{\text{г.в}}$, $\sigma_{\text{г.г}}$) объекта на различных поляризациях, которые характеризуют взаимодействие зондирующих сигналов с объектом. Данные параметры играют ключевую роль в определении суммарной энергии принятого сигнала [15].

3. Фазовая характеристика сигналов. Фаза принимаемого сигнала определяется геометрической конфигурацией системы и положением целей относительно источников излучения. Фазы также зависят от угла наклона диаграммы направленности антенн (α) и отклонением направления прихода сигнала от нормального положения. Фазовые сдвиги вызваны разницей путей распространения сигнала и влияют на общую картину обработки сигнала. Численные значения фазовых характеристик принимаемых сигналов определяются выражениями (14–17) при условии, что длина волны излучаемого сигнала обратно пропорциональна сдвигу начальных фаз принимаемых сигналов [16].

4. Технические характеристики аппаратуры и энергия сигналов. Технические показатели оборудования обеих позиций малобазовой поляризационной измерительной системы оказывают значительное влияние на энергию принимаемых сигналов [17]. В формировании итогового уровня энергии сигнального отклика непосредственно участвуют коэффициенты усиления антенн и приёмных трактов, уровень собственных шумов приёмных устройств и мощность передаваемых сигналов [18].

5. Обобщённая методика определения фаз. Разработанная методика позволяет выбрать произвольную точку в качестве центра координат малой базы поляризационной измерительной системы [19]. Эта точка может находиться внутри зоны покрытия базы В, включая даже

положение центров антенн отдельных позиций. Подобный подход расширяет гибкость системы и улучшает точность вычисления фазовых характеристик, обеспечивая универсальность метода независимо от конкретной физической реализации антенн и взаимного расположения компонентов системы [20].

Выводы

В научной статье предложена методика расчета фаз фазового центра малобазовой поляризационной измерительной системы, которая позволяет осуществлять внутреннюю задачу теории антенных систем.

Список литературы

1. Конаныхин А. Ю., Конаныхина Т. Н., Панищев В. С. Методы улучшения выделенной области изображения при быстродействующей обработке символьной информации // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 4. С. 106–119.
2. Маджд А., Казаков Л. Н., Силантьев А. Б. Использование радиолокационных сигналов с ортогональными поляризациями в задаче обнаружения находящихся за препятствием биологических объектов // T-Comm. 2022. № 10. С. 19–27.
3. Методологические основы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе комплексной субполосной обработки сверхкороткоимпульсных радиолокационных и оптических сигналов: монография / И. И. Олейник, А. А. Черноморец, Д. С. Коптев [и др.]; под общей редакцией В. Г. Андронова; Минобрнауки России, Юго-Западный государственный университет. Курск: ЮЗГУ, 2021. 203 с.
4. Олейник И. И. Представление сигналов при обработке информации в малобазовой поляризационной измерительной системе // Экономика. Информатика. 2020. № 47(3). С. 422–431.
5. Довбня В. Г., Коптев Д. С., Бабанин И. Г. Оценка потенциальной помехоустойчивости приёма цифровых сигналов, используемых в современных и перспективных системах радиорелейной и спутниковой связи // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 21–35.
6. Мухин И. Е., Хмельевская А. В., Бабанин И. Г. Методологические основы синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средствами радиомониторинга современных систем телекоммуникаций: монография / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2016. 316 с.
7. Метод и алгоритм автономного планирования траектории полета беспилотного летательного аппарата при мониторинге пожарной обстановки в целях раннего

обнаружения источника возгорания / Р. А. Томакова, С. А. Филист, А. Н. Брежнева [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 1. С. 93–110.

8. Лобач В. Т., Потипак М. В. Измерение дальности медленно движущейся цели радиолокатором с высокой разрешающей способностью по дальности // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 11(160). С. 67–75.

9. The conceptual level of analysis and its place in the infological system of information and analytical support in the tasks of operational assessment of threats posed by unmanned aerial vehicles / I. G. Babanin, V. G. Andronov, D. S. Koptev, A. I. Nikolaenko, A.E. Sevriukov // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2021 – Conference Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. Р. 9470577. <https://doi.org/10.1109/WECONF51603.2021.9470577>

10. Бабанин И. Г., Мухин И. Е., Коптев Д. С. Методологические основы выбора параметров фильтров частотной селекции с учетом эквивалентных энергетических потерь в радиоприёмных устройствах высокоскоростных радиосистем передачи информации: монография / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2020. 136 с.

11. Довбня В. Г., Коптев Д. С. Модифицированная математическая модель приемного тракта цифровых линий связи // Телекоммуникации. 2022. № 6. С. 16–23.

12. Оценка помехоустойчивости беспроводных цифровых систем связи при воздействии помех по побочным каналам приема / В. Г. Довбня, А. А. Гуламов, И. Г. Бабанин, Д. С. Коптев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8, № 3(28). С. 35–40.

13. Оценка дальности передачи видеоинформации различного качества при мониторинге чрезвычайных ситуаций с беспилотного летательного аппарата / М. Ю. Алемпьев, Д. С. Коптев, В. Г. Довбня, Е. В. Скрипкина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 31–44.

14. Андронов В. Г., Чуев А. А., Юдин И. С. Методика определения отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории по параллаксам изображений подстилающей поверхности // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023. Т. 26, № 2. С. 122–141.

15. Оценка влияния воздействия импульсных помех на достоверность принимаемых данных в спутниковых телерадиовещательных системах DVB-S2 / В. Г. Довбня, И. Г. Бабанин, А. И. Николаенко, Н. Ю. Михайлова // Телекоммуникации. 2020. № 7. С. 24–27.

16. Determination of transmission range of high-quality video information when monitoring emergency situations, using unmanned aerial vehicle / D. S. Koptev, V. G. Dovbnya, M. Yu. Alempyev, A. S. Lazarev // Телекоммуникации. 2024. № 6. С. 12–25.
17. Koptev D. S., Floresmilo L. R. H. Principles of organization of information exchange in the complex to ensure search and rescue operations using aviation means // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 12. С. 51–57.
18. Evaluation of the value of equivalent energy losses due to the quality of frequency synthesis functioning in digital communication systems with quasi-coherent reception of signals with quadrature amplitude keypad / V. G. Dovbnya, D. S. Koptev, L. R. Herman Floresmilo, G. I. Podkhaldin // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 5. С. 58–63.
19. Evaluation of the influence of the value of the dynamic range of the radio receiver on the noise immunity of receiving signals with quadrature amplitude modulation / V. G. Dovbnya, D. S. Koptev, I. G. Babanin, A. A. Knyazev // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15, № 6. С. 65–69.
20. Олейник И. И. Представление сигналов при обработке информации в малобазовой поляризационной измерительной системе // Экономика. Информатика. 2020. № 47(3). С. 422–431.

References

1. Konanykhin A.Yu., Konanykhina T.N., Panishchev V.S. Methods of improving the selected image area with high-speed processing of symbolic information. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoе priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2021;11(4):106–119. (In Russ.)
2. Majd A., Kazakov L.N., Silantyev A.B. The use of radar signals with orthogonal polarizations in the task of detecting biological objects located behind an obstacle. *T-Comm.* 2022;(10):19–27. (In Russ.)
3. Oleinik I.I., Chernomorets A.A., Koptev D.S., et al. Methodological foundations for the detection of small-sized unmanned aerial vehicles based on complex subband processing of ultra-short-pulse radar and optical signals. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2021. 203 p. (In Russ.)
4. Oleinik I. I. Representation of signals during information processing in a low-frequency polarizing measuring system. *Ekonomika. Informatika = Economics. Computer Science.* 2020;(47):422–431. (In Russ.)
5. Dovbnya V.G., Koptev D.S., Babanin I.G. Assessment of the potential interference stability of receiving digital signals used in modern and promising radio relay and satellite

communication systems. *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.* 2020;10(1):21–35. (In Russ.)

6. Mukhin I.E., Khmelevskaya A.V., Babanin I.G. Methodological foundations of the synthesis of electromagnetic access systems by means of radio monitoring of modern telecommunications systems. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2016. 316 p. (In Russ.)

7. Tomakova R.A., Filist S.A., Brezhneva A.N., et. al. Method and algorithm of autonomous flight trajectory planning of an unmanned aerial vehicle when monitoring a fire situation in order to detect the source of ignition early. *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.* 2023;13(1):93–110. (In Russ.)

8. Lobach V.T., Potipak M.V. Measuring the range of a slow-moving target with a high-resolution range radar. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering sciences.* 2014;(11):67–75. (In Russ.)

9. Babanin I.G., Andronov V.G., Koptev D.S., Nikolaenko A.I., Sevriukov A.E. The conceptual level of analysis and its place in the infological system of information and analytical support in the tasks of operational assessment of threats posed by unmanned aerial vehicles. In: *2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2021 – Conference Proceedings.* Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2021. P. 9470577. <https://doi.org/:10.1109/WECONF51603.2021.9470577>

10. Babanin I.G., Mukhin I.E., Koptev D.S. Methodological foundations for selecting the parameters of frequency selection filters, taking into account equivalent energy losses in radio receivers of high-speed radio information transmission systems. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2020. 136 p. (In Russ.)

11. Dovbnya V.G., Koptev D.S. A modified mathematical model of the receiving path of digital communication lines. *Telekommunikatsii = Telecommunications.* 2022;(6):16–23. (In Russ.)

12. Dovbnya V.G., Gulamov A.A., Babanin I.G., Koptev D.S. Evaluation of the noise immunity of wireless digital communication systems under the influence of interference via side reception channels. *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.* 2018;8(3):35–40. (In Russ.)

13. Alempyev M.Yu., Koptev D.S., Dovbnya V.G., Skripkina E.V. Evaluation of the transmission range of video information of various quality in emergency monitoring from an unmanned aerial vehicle. *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.* 2023;13(2):31–44. (In Russ.)
14. Andronov V.G., Chuev A.A., Yudin I.S. Methodology for determining deviations of unmanned aerial vehicles from a given trajectory by parallaxes of images of the underlying surface. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2023;26(2):122–141. (In Russ.)
15. Dovbnya V.G., Babanin I.G., Nikolaenko A.I., Mikhailova N.Y. Assessment of the impact of pulse interference on the reliability of received data in satellite TV and radio broadcasting systems DVB-S2. *Telekommunikatsii = Telecommunications.* 2020;(7):24–27. (In Russ.)
16. Koptev D.S., Dovbnya V.G., Alempyev M.Yu., Lazarev A.S. Determination of transmission range of high-quality video information when monitoring emergency situations, using unmanned aerial vehicle. *Telekommunikatsii = Telecommunications.* 2024;(6):12–25. (In Russ.)
17. Koptev D.S., Floresmilo L.R.H. Principles of organization of information ex-change in the complex to ensure search and rescue operations using aviation means. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport = T-Comm: Telecommunications and transport.* 2023;17(12):51–57.
18. Dovbnya V.G., Koptev D.S., Herman Floresmilo L.R., Podkhaldin G.I. Evaluation of the value of equivalent energy losses due to the quality of frequency synthesis functioning in digital communication systems with quasi-coherent reception of signals with quadrature amplitude keypad. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport = T-Comm: Telecommunications and transport.* 2023;17(5):58–63.
19. Dovbnya V.G., Koptev D.S., Babanin I.G., Knyazev A.A. Evaluation of the influence of the value of the dynamic range of the radio receiver on the noise immunity of receiving signals with quadrature amplitude modulation. *T-Comm: Telecommunications and transport.* 2021;15(6):65–69.
20. Oleinik I.I. Representation of signals during information processing in a low-base polarization measuring system. *Ekonomika. Informatika = Economics. Computer Science.* 2020;(47):422–431.

Информация об авторах / Information about the Authors

Мухин Иван Ефимович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заместитель генерального конструктора по инвестпроектам, АО «Авиавтоматика» имени В. В. Тарасова», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: okb@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0005-1583-6550

Ivan E. Mukhin, Doctor of Sciences (Engineering), Senior Researcher, Deputy General Designer for Investment Projects, JSC "Aviaautomatics" named after V. V. Tarasov", Kursk, Russian Federation, e-mail: okb@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0005-1583-6550

Попов Александр Николаевич, генеральный директор АО «Авиавтоматика» имени В. В. Тарасова», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: plant@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0004-4020-1082

Alexander N. Popov, General Director, JSC "Aviaautomatics" named after V. V. Tarasov", Kursk, Russian Federation, e-mail: plant@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0004-4020-1082

Хмелевская Алена Валентиновна, старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: aquarel85@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0656-1223

Alena V. Khmelevskaya, Senior Lecture of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: aquarel85@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0656-1223

Олейник Иван Иванович, заведующий кафедрой информационно-телекоммуникационных систем и технологий, Институт инженерных и цифровых технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: oleinik_i@bsu.edu.ru, ORCID: 0009-0000-7742-0749

Ivan I. Oleynik, Head of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Institute of Engineering and Digital Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: oleinik_i@bsu.edu.ru, ORCID: 0009-0000-7742-0749

РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-93-111>



УДК 615.5.-006+004.932.7

Набор дерматоскопических изображений для ранней диагностики злокачественных новообразований кожи

Е. С. Козачок¹✉

¹ Институт системного программирования им. В. П. Иванникова РАН
ул. Александра Солженицына, д. 25, г. Москва 109004, Российская Федерация

✉ e-mail: e.kozachok@ispras.ru

Резюме

Цель исследований – формирование набора данных дерматоскопических изображений, содержащих высококачественную разметку клинически значимых признаков кожных новообразований фототипов кожи населения России, предназначенного для ранней диагностики и выявления злокачественных кожных новообразований. Формирование и внедрение наборов дерматоскопических изображений в автоматизированные системы и подходы раннего обнаружения злокачественных новообразований кожи при проведении медицинских обследований пациентов являются актуальными направлениями исследований.

Методы. Предложен подход к формированию набора дерматоскопических изображений с высокой высококачественной разметкой клинически значимых признаков. Основу сформированного набора данных составляют дерматоскопические изображения кожных новообразований с подтвержденными диагнозами, в том числе с применением клинических методов исследования, согласно существующей нозологии пациентов дерматовенерологического профиля населения Российской Федерации врачами дерматологами и онкологами. Отличительной особенностью разработанного набора данных помимо принадлежности к фототипу кожи населения России относится высококачественная разметка клинически значимых признаков, позволяющая применять разработанный набор в методах и алгоритмах машинного обучения и распознавания образов.

Результаты. Сформированный набор дерматоскопических изображений содержит 657 дерматоскопических изображений, сопровождаемых расширенными метаданными и предварительными клиническими заключениями, меланоцитарных (меланома и невус) и не меланоцитарных (плоскоклеточный рак, дерматофиброма, сосудистые поражения, кератоз и др.) новообразований. В основу данного набора заложено распределение как по возрастному критерию, так и по принадлежности и системности течения болезни у пациентов.

Заключение. Практическая направленность сформированного набора дерматоскопических изображений с высококачественной разметкой клинически значимых признаков позволяет применять сформированные изображения как в системах поддержки принятия решений врачей при осуществлении медицинской практики, так и в системах, основанных на применении методов и алгоритмов машинного обучения для ранней диагностики злокачественных новообразований кожи.

Ключевые слова: набор данных; дерматоскопические изображения; кожные новообразования; машинное обучение; распознавание образов.

© Козачок Е. С., 2025

Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2025;15(3):93–111

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

Для цитирования: Козачок Е. С. Набор дерматоскопических изображений с высококачественной разметкой клинически значимых признаков для диагностики меланоцитарных новообразований // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 3. С. 93–111. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-93-111>

Поступила в редакцию 15.07.2025

Подписана в печать 13.08.2025

Опубликована 30.09.2025

Dermatoscopic image dataset for early diagnosis of malignant skin neoplasms

Elena S. Kozachok¹✉

¹ Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences
25 Alexander Solzhenitsyn Str., Moscow 109004, Russian Federation

✉ e-mail: e.kozachok@ispras.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop a dermatoscopic images containing high-quality labeling of clinically significant signs of skin neoplasms of the Russian population skin phototypes, intended for early diagnostics and detection of malignant skin neoplasms. The formation and implementation of sets of dermatoscopic images in automated systems and approaches to the early malignant skin neoplasms detection during medical examinations of patients is a relevant research area.

Methods. An approach to the formation of a dermatoscopic images data set with high-quality labeling of clinically significant features is proposed. The basis of the formed data set is dermatoscopic skin neoplasms images with confirmed diagnoses, including using clinical research methods, according to the existing nosology of the dermatovenereological profile patients of the Russian Federation population by dermatologists and oncologists. A distinctive feature of the developed data set, in addition to belonging to the skin phototype of the Russian population, is the high-quality labeling of clinically significant features, which allows the developed set to be used in methods and algorithms of machine learning and pattern recognition.

Results. The generated data set of dermatoscopic images contains 657 dermatoscopic images, accompanied by extended metadata and preliminary clinical conclusions, of melanocytic (melanoma and nevus) and non-melanocytic (squamous cell carcinoma, dermatofibroma, vascular lesions, keratosis, etc.) neoplasms. This data set is based on the distribution both by age criterion and by the affiliation and course systemic nature of the disease in patients.

Conclusion. The practical focus of the developed dermatoscopic images data set with high-quality marking of clinically significant features allows the use of the generated images both in decision support systems for doctors in medical practice and in systems based on the machine learning methods and algorithms usage for the early malignant skin neoplasms diagnosis.

Keywords: dataset; dermatoscopy images; skin lesions; machine learning; pattern recognition.

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

For citation: Kozachok E.S. Dermatoscopic images data set with high-quality labeling of clinically significant features for the melanocytic neoplasm's diagnosis. *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(3):93–111. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-93-111>

Received 15.07.2025

Accepted 13.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

Меланоцитарные новообразования кожи, включая меланому, представляют собой значительную проблему в современной онкологии. Меланома, несмотря на сравнительно низкую распространенность среди злокачественных опухолей кожи, характеризуется высокой агрессивностью и значительным вкладом в общую смертность от онкологических заболеваний. Ранняя диагностика новообразований данного типа является ключевым фактором, определяющим успешность лечения и общую продолжительность жизни пациентов.

Статистические данные свидетельствуют о неуклонном росте заболеваемости меланомой как в России, так и в мире. В Российской Федерации за период с 2001 по 2021 гг. распространенность меланомы на 100 тысяч населения увеличилась в 1,5 раза [1]. Согласно официальным данным Министерства здравоохранения Российской Федерации (Минздрав России), заболеваемость меланомой кожи в стране демонстрирует тенденцию к росту. В 2021 г. отмечено увеличение числа случаев меланомы кожи на 11,5% по сравнению с 2020 г. [2]. При этом в 2022 г. в России было зарегистрировано 11923 новых случая меланомы, что составляет 14,8% от всех злокачественных новообразований кожи [3].

Особенно тревожным является тот факт, что, несмотря на усилия по раннему выявлению, значительная часть случаев диагностируется на поздних стадиях, что существенно ухудшает

прогноз для пациентов. С 2018 по 2022 гг. одногодичная летальность пациентов со злокачественными новообразованиями снизилась с 22,2% до 19,2%. При этом доля пациентов, состоящих на учете 5 лет и более, увеличилась с 54,4% до 58%, а выявление злокачественных новообразований на I-II стадиях возросло с 56,4% до 59,3% [4].

В условиях растущей заболеваемости и значительной смертности от меланомы особое внимание следует уделять совершенствованию методов ранней диагностики. Дерматоскопия зарекомендовала себя как эффективный инструмент для выявления меланоцитарных новообразований на ранних стадиях [5]. Однако точность диагностики во многом зависит от опыта и квалификации специалиста [6]. В этой связи разработка автоматизированных систем анализа дерматоскопических изображений, основанных на алгоритмах машинного обучения, становится актуальной задачей современной медицины.

Для реализации указанной задачи могут быть использованы методы медицинской информатики, получившие широкое распространение и позволяющие осуществить интеграцию информационных технологий, технологий искусственного интеллекта и методов анализа данных в медицинскую практику [7]. Так алгоритмы глубокого обучения активно применяются для анализа медицинских изображений (МРТ, КТ, рентген и др.), что позволяет осуществлять раннее выявление патологий легких, сердца, головного мозга и т. д. [8].

Применение указанных технологий в онкологической практике может позволить с высокой точностью выявлять ранние стадии рака, анализируя огромные объемы медицинских данных, включая изображения, генетическую информацию и анамнез пациента [9]. При этом системы, обученные на больших наборах данных, способны как распознавать опухолевые образования на изображениях, так и прогнозировать их развитие, что значительно улучшает планирование лечения и персонализацию медицинской помощи [10].

Ключевым элементом в создании таких систем является наличие наборов данных, характеризующихся точной разметкой и выделением клинически значимых признаков, учитывающих особенности фототипов кожи, позволяющих с высокой долей вероятности правильно идентифицировать злокачественные новообразования. Существующие базы данных имеют достаточно большой объем изображений и детальную метаинформацию, но характеризуются недостаточно детальным описанием клинически значимые признаков, основанных на особенностях фототипов кожи. Наличие указанных ограничений позволяет сформировать цель проводимого исследования, состоящую в разработки набора дерматоскопических изображений с высококачественной разметкой, учитывающих особенности фототипов кожи населения России, направленного на повышение точности обнаружения меланоцитарных новообразований в процессе проведения диагностики новообразований.

Материалы и методы

В настоящее время в процессе диагностики онкологических новообразований широкое применение получили структурированные наборы данных, содержащих призаковое пространство кожных новообразований. К указанным наборам дерматоскопических изображений относятся:

- набор данных ISIC (International Skin Imaging Collaboration): ISIC-2016, ISIC-2017, ISIC-2018, ISIC-2019 и ISIC-2020 [11];
- набор данных HAM10000 (Human Against Machine with 10000 training images);
- набор данных PH2;
- набор данных IAD;
- набор данных IRMA;
- набор данных Dermaquest.

Набор данных ISIC содержит более 23000 изображений различных кожных новообразований, включая невусы, меланомы, себорейные кератозы, базальноклеточные карциномы (базалиомы), актинические кератозы, дерматофибромы и другие пигментные поражения [12]. Так набор ISIC-16 состоит из 1279 изображений (900 для обучения и 379 для тестирования методами машинного обучения) невусов и меланом с разрешением от 556×679 до 2848×4828 пикселей для осуществления бинарной классификации или сегментации кожных новообразований.

Набор ISIC-17 содержит 2750 изображений с разрешением от 453×679 до 4499×6748 пикселей следующих кожных новообразований: невус (1372 изображения для обучения, 78 – валидации и

393 – тестирования), себорейный кератоз (254 – обучение, 42 – валидация и 90 – тестирование) и меланома (374 – обучение, 30 – валидация и 117 – тестирование) [13].

Набор изображений ISIC-18 сформирован из набора данных HAM10000 и содержит 10015 изображений с разрешением 450×600 пикселей для реализации многоклассовой классификации на семь классов: невусы (6705 изображений), себорейные кератозы (1099 изображений), базальноклеточные карциномы (514 изображений), актинические кератозы (327 изображений), дерматофибромы (115 изображений), сосудистые поражения кожи (142 изображения) и меланомы (1113 изображений). Кроме того, в набор входят 12500 изображений для реализации бинарной сегментации новообразований [14].

В отличие от ISIC-18 набор ISIC-19 дополнен еще одним классом кожных новообразований – плоскоклеточной карциномой. При этом объем выборки увеличен практически в два раза по сравнению с ISIC-18 и составляет 24765 изображений с разрешением от 600×450 до 1024×1024 пикселей, основанных на изображениях из таких наборов данных, как HAM10000, BCN2000 и др. Набор ISIC-19 состоит из следующих изображений: невусы (12875), себорейные кератозы (2624), базальноклеточные карциномы (3323), актинические кератозы (867), дерматофибромы (239), сосудистые поражения кожи (253), меланомы (4522) и плоскоклеточные карциномы (62).

ISIC-20 содержит наибольшее количество изображения из всех наборов

ISIC, составляющее 33090 дерматоскопических изображений с разрешением 1024×1024 пикселей. Стоит отметить, что указанный набор включает два класса изображений: невусы (32542 изображения) и меланы (548 изображений).

Отличительной особенностью всех наборов ISIC является то, что каждое изображение сопровождается подробной разметкой клинически значимых признаков, таких как асимметрия, границы, цветовые вариации и дерматоскопические структуры, что позволяет использовать указанный набор в процессе проведения диагностики новообразований методами машинного обучения.

Набор данных HAM10000 включает 10 015 дерматоскопических изображений, охватывающих семь классов кожных новообразований [15]:

- 1) меланома: 1113 изображений;
- 2) невус: 6705 изображений;
- 3) базальноклеточная карцинома: 514 изображений;
- 4) актинический кератоз: 327 изображений;
- 5) себорейный кератоз: 1099 изображений;
- 6) дерматофиброма: 115 изображений;
- 7) сосудистые поражения: 142 изображения.

Каждое изображение снабжено метаданными, содержащими информацию о диагнозе, локализации и клинических признаках. Указанный набор изображений является базовым, включенным во многие наборы дерматоскопических изображений, и широко применяемым в процессе обучения и тестирования

алгоритмов классификации методов машинного обучения при решении задач обнаружения кожных новообразований в процессе дерматологических исследований.

PH2 Database содержит 200 дерматоскопических изображений меланоцитарных поражений с разрешением 768×560 пикселей, из которых 80 – доброкачественные невусы, 80 – атипичные невусы и 40 – меланомы [16]. Каждое изображение из набора сопровождается экспертной разметкой, включающей идентификацию границ поражения, цветовых и текстурных характеристик, а также диагностических признаков, таких как наличие сетки, глобул и гомогенных областей. Каждый из представленных параметров оценен экспертами дерматологами.

Рассмотренные наборы данных дерматоскопических изображений являются свободно распространяемыми и представлены в открытом доступе, что позволяет использовать указанные наборы не только во врачебной практике, но и в процессе обучения алгоритмов классификации и моделей машинного обучения для распознавания злокачественных кожных новообразований. Наряду с рассмотренными наборы данных во врачебной практике применяются следующие наборы дерматоскопических изображений: IAD, IRMA, Dermaquest, Dermofit Image Library и DERM12345, которые не доступны для общего пользования, что не позволяет использовать их в процессе обнаружения кожных новообразований методами машинного обучения.

Набор данных IAD содержит 100 изображений, из которых 70 изображений невусов и 30 меланом, с разрешением 700×447 пикселей в цветовой схеме RGB без соответствующих масок сегментации. Однако поциальному запросу разработчиками набора данных такие маски могут быть предоставлены только для проведения исследований.

Так же, как и набор данных IAD, набор данных IRMA доступен только по специальному запросу к Рейнско-Вестфальском техническому университету Ахена. Он содержит 747 дерматоскопических изображений с разрешением 512×512 пикселей, из которых 187 изображений относятся к меланомам, а 560 – к невусам. Набор данных Dermaquest [17] характеризуется наличием 137 изображений, 76 из которых являются меланомами и 61 – невусами.

Dermofit Image Library содержит 1300 высококачественных изображений различных кожных заболеваний, включая: меланомы (76 изображений), невусы (331 изображение), кератозы (302 изображения), базальноклеточные карциномы (239 изображений), дерматофибромы (65 изображений), сосудистые поражения кожи (199 изображений) и плоскоклеточный рак (88 изображений) [18]. Каждое изображение сопровождается подробным описанием и разметкой клинически значимых признаков, осуществленными врачами-дерматологами.

DERM12345 – набор данных дерматоскопических изображений, содержащий 12345 изображений кожных новообразований фототипов кожи жителей переходной зоны Европы и Азии, преимущественно жителей Турции [19].

Набор DERM12345 состоит из 5 суперклассов, 15 основных классов и 40 подклассов изображений с высоким разрешением (до 3840×2160 пикселей) и экспертными аннотациями, включая классы новообразований:

1) меланоцитарные доброкачественные: 10043 изображения;

2) меланоцитарные злокачественные (меланома): 400 изображений;

3) немеланоцитарные доброкачественные (кератоз, дерматофиброма, сосудистые поражения): 1077 изображений;

4) немеланоцитарные неопределенные (актинический кератоз): 58 изображений;

5) немеланоцитарные злокачественные (саркома Капоши, болезни Боуэна и Педжета молочной железы, базально-клеточный и плоскоклеточный рак и др.): 767 изображений.

Распределение изображений в представленных наборах дерматоскопических изображений приведено ниже (табл. 1).

Таблица 1. Распределение изображений по типам кожных новообразований в наборах данных дерматоскопических изображений

Table 1. Image distribution by skin lesion types in dermatoscopic image data sets

Набор данных Dataset	Кол-во изображений Images	Невус Nev	Себорей-ный кератоз SK	Базально-клеточная карцинома BCC	Актини-ческий кератоз AK	Дер-мато-фиброма DF	Сосуди-стые по-ражения VL	Плоско-клеточ-ный рак SC	Мела-нома Mel
ISIC-16	1279	727	—	—	—	—	—	—	173
ISIC-17	2750	1843	386	—	—	—	—	—	521
ISIC-18	10015	6705	1099	514	327	115	142	—	1113
ISIC-19	24765	12875	2624	3323	867	239	253	62	4522
ISIC-20	33090	32542	—	—	—	—	—	—	548
HAM 10000	10015	6705	1099	514	327	115	142	—	1113
PH2	200	160	—	—	—	—	—	—	40
IAD	100	70	—	—	—	—	—	—	30
IRMA	747	560	—	—	—	—	—	—	187
Derma-quest	137	61	—	—	—	—	—	—	76
Dermofit Image Library	1300	331	257	239	45	65	199	88	76
DERM 12345	12345	8278	607	423	58	184	282	303	400

Проведенный анализ наборов данных дерматоскопических изображений позволяет сделать вывод о наличие достаточно большого объема изображений, содержащих злокачественные новообразования кожи, разработанных с учетом специфики и требований методов и алгоритмов машинного обучения, а также фототипов кожи различных стран и этнических групп. В то же время существенным недостатком рассмотренных наборов является то, что в процессе их формирования не учитываются особенности фототипов кожи населения России, что, в свою очередь, не позволяет использовать данные наборы в процессе диагностики меланоцитарных новообразований на территории Российской Федерации.

Для формирования набора данных дерматоскопических изображений с высококачественной разметкой клинически значимых признаков, учитывающего особенности фототипов кожи населения России (I–IV фототипы по классификации Фишпатрика), реализованы следующие этапы:

1) получение информированного согласия у пациентов дерматовенерологического профиля на исследование кожных новообразований;

2) дерматоскопия пораженных областей кожи врачом-дерматологом и/или онкологом с целью постановки первичного диагноза;

3) создание снимка высокой четкости новообразования и сбор метаданных, содержащих обезличенную информацию

о пациенте (возраст, пол, информация о типе новообразования, предварительном диагнозе и пр.);

4) проведение клинических исследований (биопсия и гистологический анализ) для подтверждения (опроверждения) первичного диагноза (в случае необходимости по решению врача);

5) добавление дерматоскопического изображения и метаданных в набор данных дерматоскопических изображений;

6) разметка клинически значимых признаков (асимметрия, границы, цветовые вариации, диаметр и динамика изменений);

7) разметка дерматоскопических изображений клинически значимыми признаками, выполняемая независимо не менее чем тремя врачами-дерматологами и/или онкологами.

Для соблюдения принципов анонимизации и защиты персональных данных пациентов, установленных нормативно-правовыми актами Российской Федерации¹, на этапе получение информированного согласия данных каждому пациенту присваивается уникальный идентификатор (patient ID)². В качестве patient ID используется уникальная символьная строка, полученная в результате криптографического хэширования комбинации номера СНИЛС и даты рождения пациента, что позволяет исключить необходимость хранения или обработки конфиденциальной информации и персональных данных пациентов.

На этапе постановки первичного диагноза врачами дерматологами и/или

¹ О персональных данных: Федеральный закон от 27.07.2006 г. № 152-ФЗ: [ред. от 08.08.2024 г.]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372682/3d0cac60971a511280cbba229d9b6329c07731f7/ (дата обращения: 11.06.2025).

² Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации: Федеральный закон от 21.11.2011 г. № 323-ФЗ: [ред. от 13.07.2022 г.]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_121895/ (дата обращения: 11.06.2025).

онкологами осуществляется дерматоскопия пораженных областей кожи, позволяющая классифицировать изображения согласно классификаторам нозологии

кожных новообразований. Для постановки первичного диагноза применяются неинвазивные методы диагностики (табл. 2).

Таблица 2. Точность постановки первичного диагноза неинвазивными методами

Table 2. Primary diagnosis accuracy using non-invasive methods

Метод диагностирования Diagnostic method	Чувствительность, % Sensitivity, %	Специфичность, % Specificity, %
Правило ABCD (без E и F) ABCD Rule (without E and F)	47,3 (для меланом $d < 3$ мм)	47,3 (для меланом $d < 3$ мм)
Дерматоскопическое правило ABCD Dermatoscopy ABCD rule	84,1	83,5
Алгоритм CASH Algorithm CASH	98	68
7-точечный список Макки Mackey's 7-point list	91,7	53,5
7-точечное правило Ардженциано Argenziano's 7-point rule	97	71
Метод Мензиса Menzies method	92	71
Метод TADA TADA method	94	73,5

Стоит отметить, что полученные результаты экспериментальных оценок (чувствительность и специфичность) неинвазивных методов не позволяют обеспечить гарантированную постановку первичного диагноза о наличии или отсутствии новообразований и зачастую накладывают требование по проведению дополнительных клинических исследований.

На этапе создания снимка высокой четкости новообразования и сбора метаданных осуществляется фотографирование новообразования с итоговым разрешением изображения 4032×3024 пикселей. Примеры изображений из сформированного набора данных представлены ниже (рис. 1).



Рис. 1. Примеры дерматоскопических изображения из сформированного набора данных

Fig. 1. Dermatoscopic images examples from the generated data set

Каждое изображение новообразования содержит метаинформацию, обеспечивающую высокую степень клинической информативности. В состав метаданных входят следующие компоненты:

- данные о специалисте, проводившем обследование: идентификатор пользователя (username);
- дата и время проведения исследования (date);
- информация о пациенте: возраст (age), пол (sex), тип волос (hair), тип кожи (skin), фототип кожи по Фицпатрику (group), сведения о наследственности (genetic), характеристики иммунного статуса (immune);
- информация о кожном новообразовании: анатомическая локализация (place), размер образования (size), общее количество родинок (count), наличие красных точек (dots), цвет (color);
- предварительный клинический диагноз (diagnosis), установленный по результатам визуального и дерматоскопического осмотра;
- заключение по результатам гистологического исследования (result) при наличии такового.

Расширенная структура метаданных обеспечивает возможность как подробного клинического анализа, так и глубокой многофакторной валидации моделей машинного обучения, включая стратификацию по фототипу кожи, возрасту, полу, типу образования и другим признакам.

Разметка клинически значимых признаков на дерматоскопических изображениях с последующей разметкой дерматоскопических изображений

клинически значимыми признаками состоит из следующих шагов:

- определение клинически значимых признаков: асимметрия – различие формы, структуры и распределения пигментации в различных половинах образования; границы – степень четкости, ровности и непрерывности контура новообразования; цветовая вариабельность – наличие нескольких цветов, включая черный, коричневый, синий, белый и красный и дерматоскопические структуры – сетка, глобулы, псевдоподы, вуаль, сосудистые паттерны и другие характерные элемент;
- создание аннотационной системы и стандартизация. Для обеспечения воспроизводимости и унификации разметки создаются стандартизованные протоколы аннотирования, включающие: алгоритм ABCD, шкалу TDS (Total Dermatoscopy Score) и алгоритм CHAOS & CLUES; правила аннотирования каждого признака, включая точные границы и допустимые вариации;
- экспертная разметка и валидация. Процесс разметки проводится в несколько шагов: первичная и консенсусная валидация, а также обратная связь и дообучение.

Сформированные дерматоскопические изображения составляют уникальный набор данных дерматоскопических изображений, включающий 657 изображений, отличающийся высококачественной ручной разметкой, расширенными метаданными (возраст, пол, фототип кожи, локализация, цвет, артефакты и др.) и репрезентативностью в отношении популяции Российской Федерации

(I–IV фототипы кожи по классификации Фишпатрика).

Результаты и их обсуждение

В процессе формирования набора данных дерматоскопических изображений посредством проспективного клинического наблюдения сформировано 657 дерматоскопических изображений от 208 пациентов дерматовенерологического профиля, сопровождаемых расширенными метаданными и предварительными клиническими заключениями, полученными в условиях реальной медицинской практики. Для каждого случая разметка была выполнена опытными дерматологами с учетом визуальных признаков, типичных для широкого спектра кожных новообразований, как

меланоцитарной, так и немеланоцитарной природы.

Диагнозы были установлены на основании клинической и дерматоскопической оценки, в ряде случаев с последующим гистологическим подтверждением. Стоит отметить, что гистология не являлась обязательным критерием включения в процесс медицинского осмотра, что, в свою очередь, позволяет отразить реалии амбулаторной практики и повысить прикладную ценность формируемого набора данных.

На рисунке 2 представлено распределение собранных дерматоскопических изображений по основным нозологическим категориям, представленным в наборе данных.

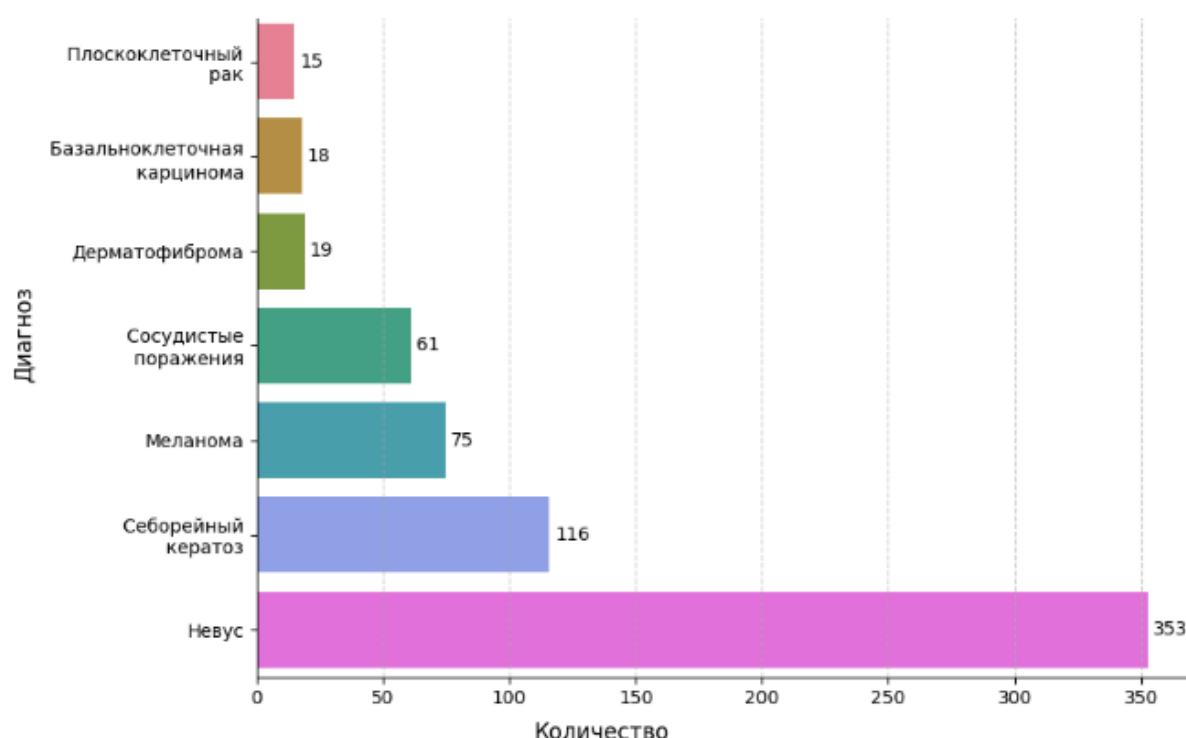


Рис. 2. Распределение изображений в наборе данных по классам нозологии кожных новообразований

Fig. 2. Images distribution in the data set by classes of skin neoplasm nosology

Исходя из графика значительное преобладание по количеству наблюдается в группе невусов (353 изображения), что составляет более половины всех случаев. Такое смещение в сторону невусов является ожидаемым и клинически оправданным, поскольку:

1) пигментные невусы представляют собой наиболее частую причину обращений к дерматологу, особенно при наличии подозрительных признаков (асимметрия, неровные границы, изменение цвета), требующих дифференциальной диагностики с меланомой;

2) пациенты с большим количеством невусов часто находятся под диспансерным наблюдением, в результате чего у одного пациента может быть получено несколько снимков разных образований;

3) в реальной практике невусы часто становятся объектами динамического наблюдения и тем самым обеспечивают больший объем визуальных данных пациента.

Следующими по частоте встречаемости являются:

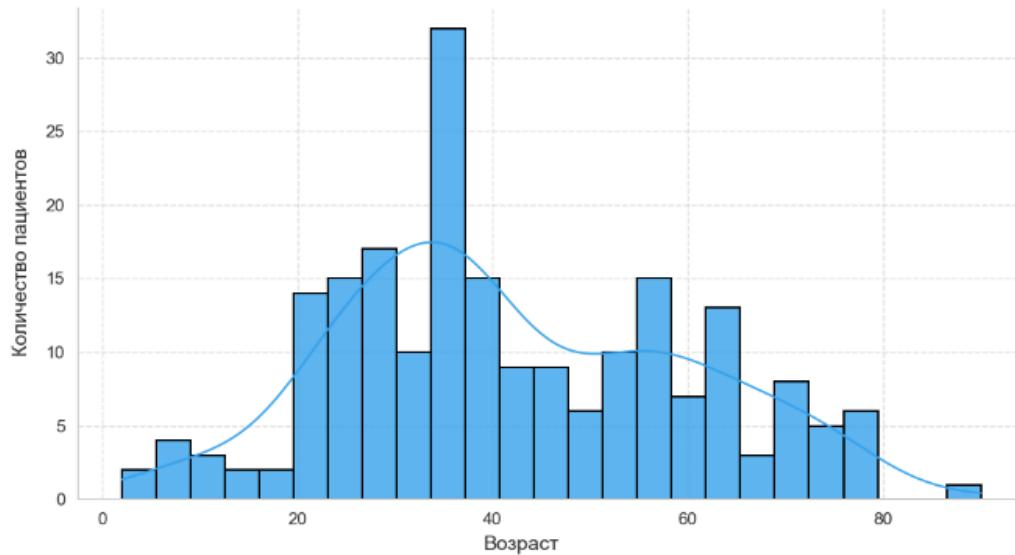
1. Себорейный кератоз (116 изображений) – доброкачественное образование, которое часто ошибочно принимается за меланому как пациентами, так и врачами, особенно при атипичной локализации или выраженной пигментации.

2. Меланома (75 изображений), характеризуется сравнительно меньшим числом, при этом остается одним из наиболее значимым и распространенным злокачественным кожным новообразованием.

3. Сосудистые поражения (61 изображение), дерматофибромы (19 изображений), а также злокачественные опухоли немеланоцитарного происхождения: базальноклеточная карцинома (18 изображений) и плоскоклеточный рак (15 изображений), представлены в меньшем объеме, что отражает их редко встречающуюся при диагностике и в рамках амбулаторного дерматоскопического скрининга, а также потенциальную сложность их визуальной верификации без гистологического подтверждения.

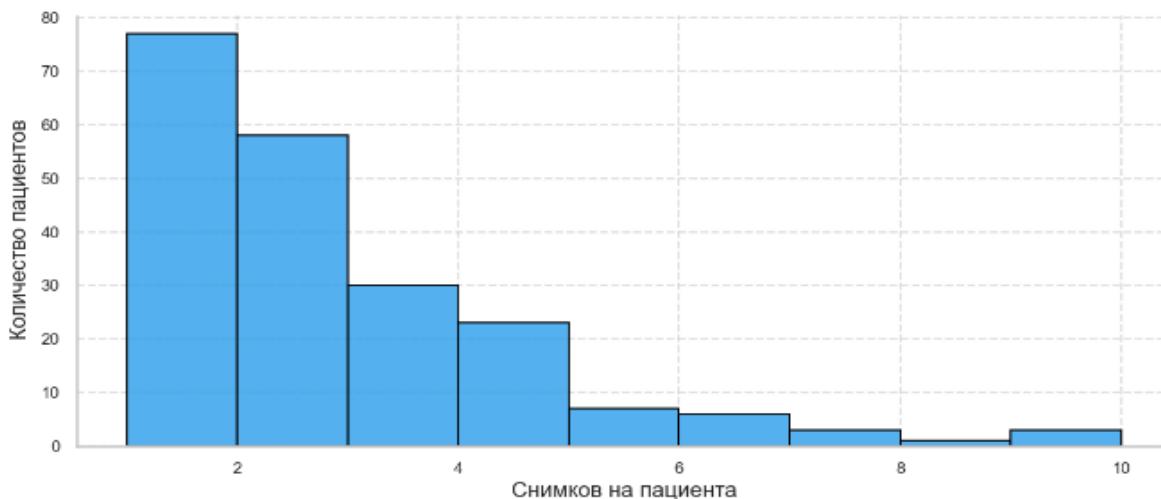
Представленное распределение отражает естественную клиническую структуру обращаемости, а также специфику отбора данных в условиях амбулаторной практики. Кроме того, полученные значения распределения изображений одновременно подчеркивают потребность в балансировке классов при обучении моделей машинного обучения и важность включения большого числа негативных (доброкачественных) случаев для повышения специфичности диагностических алгоритмов.

На рисунке 3 приведено распределение возрастов 208 пациентов на момент обследования. Основная масса наблюдений приходится на возрастной интервал от 25 до 65 лет с пиком около 35 лет. Это отражает активную диагностическую активность указанных возрастных групп, а также высокую онкоастороженность и темпы распространения злокачественных кожных новообразований.

**Рис. 3.** Распределение пациентов дерматовенерологического профиля по возрасту**Fig. 3.** Patients distribution with dermatovenereological profile by age

Ввиду того, что пациенты дерматовенерологического профиля могут иметь более одного заболевания или характеризуются наличием нескольких локализаций, на рисунке 4 представлено распределение числа дерматоскопических изображений, приходящихся на одного пациента в сформированном наборе данных. В большинстве случаев (порядка 25%) присутствует только одно

изображение на пациента, однако в наборе данных присутствуют пациенты с множественными образованиями и/или серийным наблюдением – вплоть до 9 снимков. Данная особенность позволяет формировать профиль выборки, приближенный к амбулаторной клинической практике, где одному пациенту может соответствовать несколько подозрительных очагов новообразований.

**Рис. 4.** Распределение количества снимков в расчете на одного пациента**Fig. 4.** Distribution of the images numbers per patient

Разработанный набор дерматоскопических изображений состоит из 657 изображений, включая меланоцитарные (содержащие клетки меланоцитов): невус и меланома – 428 – и немеланоцитарные (не содержащие клетки меланоцитов): базальноклеточная карцинома, плоскоклеточный рак, дерматофиброма, сосудистые поражения и себорейный кератоз – 229 изображений.

Стоит отметить, что сформированный набор данных дерматоскопических изображений значительно уступает по количеству изображений таким наборам, как ISIC, HAM1000, IRMA, Dermofit Image Library и DERM12345. При этом разработанный набор данных по нозологическому разнообразию и этнопопуляционной репрезентативности превосходит такие общедоступные наборы, как PH2, IAD, IRMA и DermaQuest, в которых либо ограничено количество изображений, либо представлены лишь одна-две диагностические категории. В отличие от них представленный набор данных охватывает все основные типы кожных новообразований, включая как доброкачественные, так и злокачественные, а также сосудистые образования и дерматофибромы, что делает его более подходящим для обучения универсальных и клинически применимых диагностических моделей. Кроме того, стоит отметить уникальность сформированного набора данных, заключающуюся в том, что он сформирован на основе фототипов кожи пациентов, населяющих территорию Российской Федерации, что либо не представлено в международных наборах, таких как ISIC или HAM1000, либо ориентировано на

другие популяционные группы населения, например Турции, как в наборе данных DERM12345.

Сформированный набор данных дерматоскопических изображений предназначен для многопрофильного применения: он может быть использован как в клинической практике дерматологов и онкологов при проведении дерматоскопических исследований, так и в научных и прикладных целях, включая обучение, валидацию и тестирование алгоритмов машинного обучения, ориентированных на автоматизированную поддержку принятия решений врача.

Выводы

Благодаря качественной разметке, разнообразию нозологий, учету фототипов кожи, характерных для населения России, и наличию расширенных метаданных, набор данных изображений представляет собой значимый ресурс как для улучшения клинической диагностики, так и для разработки интеллектуальных медицинских систем, способных повысить точность и эффективность скрининга кожных новообразований в реальных условиях здравоохранения.

Основным направлением дальнейших исследований является дальнейшее расширение и обновление сформированного набора дерматоскопических изображений, включая:

- дополнение набора данных новыми изображениями диагностированных кожных новообразований;
- добавление новых классов злокачественных кожных новообразований, ранее недостаточно представленных в наборе данных;

– увеличение доли изображений, соответствующих различным фототипам кожи населения России, включая фототипы IV и выше.

Решение указанных задач позволит использовать сформированный набор дерматоскопических изображений в

процессе обучения и применения методов и алгоритмов машинного обучения и систем оптического распознавания, внеся вклад в развитие систем телемедицинской диагностики и совершенствования методов ранней диагностики заболеваний.

Список литературы

1. Меланома кожи (C43): анализ тенденций заболеваемости и смертности в свете пандемии COVID-19, молекулярная эпидемиология / Ю. О. Бахарева, В.О. Тараканова, М. Ю. Рубаняк, Е. М. Каменских // Вопросы онкологии. 2023. Т. 69, № 4. С. 631–638. <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2023-69-4-631-638>
2. Директор Государственного научного центра дерматовенерологии и косметологии Минздрава России, академик РАН Алексей Кубанов о вредном воздействии солнечных лучей и защите от них // Министерство здравоохранения Российской Федерации URL: <https://minzdrav.gov.ru/news/2022/07/04/18987-direktor-gosudarstvennogo-nauchnogo-tsentr-a-dermatovenerologii-i-kosmeto-logii-minzdrava-rossii-akademik-ran-aleksey-kubanov-o-vrednom-vozdeystvii-solne-chnyh-luchey-i-zaschite-ot-nih> (дата обращения: 11.06.2025).
3. Современное состояние заболеваемости и диагностики меланомы и других злокачественных новообразований кожи в Российской Федерации и Уральском федеральном округе / Н. П. Малишевская, А. В. Соколова, В. В. Петкау, Л. В. Демидов, В. А. Игликов // Эффективная фармакотерапия. 2024. № 20(5). С. 18–23. <https://doi.org/10.33978/2307-3586-2024-20-5-18-23>
4. Федеральный проект «Борьба с онкологическими заболеваниями» // Министерство здравоохранения Российской Федерации. URL: <https://minzdrav.gov.ru/poleznye-resursy/natsproektzdravoohranenie/onko> (дата обращения: 11.06.2025).
5. Бакулев А. Л., Конопацкова О. М., Станчина Ю. В. Дерматоскопия в диагностике пигментных невусов кожи // Вестник дерматологии и венерологии. 2019. № 95(4). С. 48–56. <https://doi.org/10.25208/0042-4609-2019-95-4-48-56>
6. Хисматуллина З. Р., Чеботарев В. В., Бабенко Е. А. Современные аспекты и перспективы применения дерматоскопии в дерматоонкологии // Креативная хирургия и онкология. 2020. Т. 10, № 3. С. 241–248. <https://doi.org/10.24060/2076-3093-2020-10-3-241-248>
7. Ранняя диагностика злокачественных новообразований кожи с помощью технологий искусственного интеллекта / С. О. Самохин, А. В. Патрушев, Ю. И. Акаева, С. А. Парфенов, Г. Г. Кутелев // Вестник дерматологии и венерологии. 2024. Т. 100, № 1. С. 38–46. <https://doi.org/10.25208/vdv16746>

8. Применение моделей машинного обучения для многоклассовой классификации дерматоскопических снимков новообразований кожи / А. В. Козачок, А. А. Спирин, О. И. Самоваров, Е. С. Козачок // Труды Института системного программирования РАН. 2024. Т. 36, № 5. С. 241–252. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2024-36\(5\)-17](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2024-36(5)-17)
9. Хабарова Р. И., Кулева С. А. Искусственный интеллект в диагностике доброкачественных новообразований кожи у пациентов детского возраста. Интеграция нейронной сети в мобильное приложение // Вопросы онкологии. 2022. Т. 68, № 6. С. 820–826. <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2022-68-6-820-826>
10. Козачок А. В., Спирин А. А., Козачок Е. С. Обзор методов раннего обнаружения меланомы // Труды института системного программирования РАН. 2022. Т. 34, № 4. С. 241–250. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34\(4\)-17](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34(4)-17)
11. The International Skin Imaging Collaboration // ISIC Archive. URL: <https://www.isic-archive.com> (дата обращения: 11.06.2025).
12. Skin lesion analysis toward melanoma detection: A challenge at the international symposium on biomedical imaging (ISBI) 2016, hosted by the international skin imaging collaboration (ISIC) / D. Gutman, N. C. Codella, E. Celebi, B. Helba, M. Marchetti, N. Mishra, A. Halpern // Computer Vision and Pattern Recognition. 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1605.01397> (дата обращения: 11.06.2025). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1605.01397>
13. Skin lesion analysis toward melanoma detection: A challenge at the international symposium on biomedical imaging (ISBI) 2017, hosted by the international skin imaging collaboration (ISIC) / N. C. Codella, D. Gutman, M. E. Celebi, B. Helba, M. A. Marchetti, S. W. Dusza, A. Kalloo, K. Liopyris, N. Mishra, H. Kittler // 2018 IEEE 15th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2018). P. 168–172. URL: <https://arxiv.org/abs/1710.05006> (дата обращения: 11.06.2025). <https://doi.org/10.1109/ISBI.2018.8363547>
14. Skin lesion analysis toward melanoma detection 2018: A challenge hosted by the international skin imaging collaboration (ISIC) / N. Codella, V. Rotemberg, P. Tschandl, M. E. Celebi, S. Dusza, D. Gutman, B. Helba, A. Kalloo, K. Liopyris, M. Marchetti // Computer Vision and Pattern Recognition. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1902.03368> (дата обращения: 11.06.2025). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.03368>
15. Tschandl P., Rosendahl C., Kittler H. The HAM10000 dataset, a large collection of multi-source dermatoscopic images of common pigmented skin lesions // Scientific Data. 2018. Vol. 5. P. 1–9. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.161>
16. Mendonça T., Ferreira P. M., Marques J. S. PH² – A Dermoscopic Image Database for Research and Benchmarking // Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Osaka, Japan: IEEE, 2013. P. 5437–5440. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2013.6610779>

17. A survey, review, and future trends of skin lesion segmentation and classification / H. Kamrul, A. Asif, H. Y. Choon, Y. Guang // Computers in Biology and Medicine. 2023. Vol. 155. P. 1–36. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2023.106624>
18. Dermofit Image Library // The University of Edinburgh. URL: <https://licensing.edinburgh-innovations.ed.ac.uk/product/dermofit-image-library> (дата обращения: 11.06.2025).
19. DERM12345: A Large, Multisource Dermatoscopic Skin Lesion Dataset with 40 Subclasses / A. Yilmaz, S. P. Yasar, G. Gencoglan, B. Temelkuran // Scientific Data. 2024. N 11. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-04104-3>

References

1. Bakhareva Yu.O., Tarakanova V.O., Rubanyak M.Yu., Kamenskikh E.M. Skin Melanoma (C43): Analysing incidence and mortality trends in the context of the COVID-19 pandemic, molecular epidemiology. *Voprosy onkologii = Issues of Oncology*. 2023;69(4):631–638. (In Russ.) <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2023-69-4-631-638>
2. Alexey Kubanov, Director of the State Scientific Center for Dermatovenerology and Cosmatology of the Ministry of Health of the Russian Academy of Sciences, on the harmful effects of sunlight and protection from them. Ministry of Health of the Russian Federation. (In Russ.) Available at: <https://minzdrav.gov.ru/news/2022/07/04/18987-direktor-gosudarstvennogo-nauchnogo-tsentr-a-dermatovenerologii-i-kosmetologii-minzdrava-rossii-akademik-aleksey-kubanov-o-vrednom-vozdeystvii-solne-chnyh-luchey-i-zashchite-ot-nih> (accessed 11.06.2025).
3. Malishevskaya N.P., Sokolova A.V., Petkau V.V., Demidov L.V., Iglikov V.A. The current state of the incidence and diagnosis of melanoma and other malignant neoplasms of the skin in the Russian Federation and the Ural Federal District. *Effective Pharmacotherapy*. 2024; (20):18–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.33978/2307-3586-2024-20-5-18-23>
4. Federal project "Fight against oncological diseases". Ministry of Health of the Russian Federation. (In Russ.) Available at: <https://minzdrav.gov.ru/poleznye-resursy/natsproektzdraovoohranenie/onko> (accessed 11.06.2025).
5. Bakulev A.L., Konopatskova O.M., Stanchina Yu.V. Dermatoscopy in the diagnosis of pigmented skin nevi. *Vestnik dermatologii i venerologii = Bulletin of Dermatology and Venereology*. 2019;(95):48–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.25208/0042-4609-2019-95-4-48-56>
6. Khismatullina Z.R., Chebotarev V.V., Babenko E.A. Modern aspects and prospects of using dermatoscopy in dermatoncology. *Kreativnaya khirurgiya i onkologiya = Creative Surgery and Oncology*. 2020;10(3):241–248. (In Russ.) <https://doi.org/10.24060/2076-3093-2020-10-3-241-248>
7. Samokhin S.O., Patrushev A.V., Akayeva Yu.I., Parfenov S.A., Kutelev G.G. Early diagnosis of skin malignancies using artificial intelligence technologies. *Vestnik dermatologii*

i venerologii = Bulletin of Dermatology and Venereology. 2024;100(1):38–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.25208/vdv16746>

8. Kozachok A.V., Spirin A.A., Samovarov O.I., Kozachok E.S. Application of machine learning models for multiclass classification of dermatoscopic images of skin neoplasms. *Trudy instituta sistemnogo programmirovaniya RAN = Proceedings of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences.* 2024;36(5):241–252. (In Russ.) [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2024-36 \(5\)-17](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2024-36 (5)-17)

9. Khabarova R.I., Kuleva S.A. Artificial intelligence in the diagnosis of benign skin neoplasms in pediatric patients. Integration of a neural network into a mobile application. *Voprosy onkologii = Issues of Oncology.* 2022;68(6):820–826. (In Russ.) <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2022-68-6-820-826>

10. Kozachok A.V., Spirin A.A., Kozachok E.S. Review of methods for early detection of melanoma. *Trudy institut sistemnogo programmirovaniya RAN = Proceedings of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences.* 2022;34(4):241–250. (In Russ.) [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34\(4\)-17](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34(4)-17)

11. The International Skin Imaging Collaboration. ISIC Archive. Available at: <https://www.isic-archive.com> (accessed 11.06.2025)

12. Gutman D., Codella N.C., Celebi E., Helba B., Marchetti M., Mishra N., Halpern A. Skin lesion analysis towards melanoma detection: A challenge at the international symposium on biomedical imaging (ISBI) 2016, hosted by the international skin imaging collaboration (ISIC). *Computer Vision and Pattern Recognition.* 2016. Available at: <https://arxiv.org/abs/1605.01397> (accessed 11.06.2025). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1605.01397>

13. Codella N.C., Gutman D., Celebi M.E., Helba B., Marchetti M.A., Dusza S.W., Kalloo A., Liopyris K., Mishra N., Kittler H. Skin lesion analysis towards melanoma detection: A challenge at the international symposium on biomedical imaging (ISBI) 2017, hosted by the international skin imaging collaboration (ISIC). In: *2018 IEEE 15th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2018).* P. 168–172. Available at: <https://arxiv.org/abs/1710.05006> (accessed 11.06.2025). <https://doi.org/10.1109/ISBI.2018.8363547>

14. Codella N., Rotemberg V., Tschandl P., Celebi M.E., Dusza S., Gutman D., Helba B., Kalloo A., Liopyris K., Marchetti M. Skin lesion analysis toward melanoma detection 2018: A challenge hosted by the international skin imaging collaboration (ISIC). *Computer Vision and Pattern Recognition.* 2019. Available at: <https://arxiv.org/abs/1902.03368> (accessed 11.06.2025). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.03368>

15. Tschandl P., Rosendahl C., Kittler H. The HAM10000 dataset, a large collection of multi-source dermatoscopic images of common pigmented skin lesions. *Scientific Data.* 2018;5:1–9. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.161>

16. Mendonça T., Ferreira P.M., Marques J.S. PH² – A Dermoscopic Image Data-base for Research and Benchmarking. In: *Annual International Conference of the IEEE Engineering in*

Medicine and Biology Society (EMBC). Osaka, Japan: IEEE; 2013. P. 5437–5440.
<https://doi.org/10.1109/EMBC.2013.6610779>

17. Kamrul H., Asif A., Choon H.Y., Guang Y. A survey, review, and future trends of skin lesion segmentation and classification. *Computers in Biology and Medicine*. 2023;155:1–36. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2023.106624>

18. Dermofit Image Library. The University of Edinburgh. Available at: <https://licensing.edinburgh-innovations.ed.ac.uk/product/dermofit-image-library> (accessed 11.06.2025).

19. Yilmaz A., Yasar S.P., Gencoglan G., Temelkuran B. DERM12345: A Large, Multi-source Dermatoscopic Skin Lesion Dataset with 40 Subclasses. *Scientific Data*. 2024;(11). <https://doi.org/10.1038/s41597-024-04104-3>

Информация об авторе / Information about the Author

Козачок Елена Сергеевна, специалист,
Институт системного программирования
им. В. П. Иванникова РАН,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: e.kozachok@ispras.ru,
Researcher ID: rid108085,
ORCID: 0009-0007-9432-1663

Elena S. Kozachok, Specialist,
Ivannikov Institute for System Programming
of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: e.kozachok@ispras.ru,
Researcher ID: rid108085,
ORCID: 0009-0007-9432-1663

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-112-121>

УДК 004.421.2

**Использование модели видеонаблюдения для системы
«умной среды» в организации работы регионального оператора
по обращению с твердыми коммунальными отходами**

Д. В. Александров¹✉, А. А. Гуламов¹

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

✉ e-mail: di46ma@mail.ru

Резюме

Целью исследования является изучение концепции «умной среды» и проектирование системы видеонаблюдения для решения вопроса своевременного вывоза твердых коммунальных отходов региональным оператором. Функция этих технологий – мониторинг окружающей среды в режиме реального времени 24 часа в сутки в течение семи дней недели. Внедрение «умной среды» принесет выгоды и улучшит качество жизни городского сообщества. Целью «умной среды» является управление и создание устойчивой окружающей среды, обеспечивающей максимальное использование технологий на благо населения.

Методы исследования основаны на Постановлении Правительства РФ от 20.05.2022 г. № 913 «Об утверждении положения о федеральной государственной информационной системе учета твердых коммунальных отходов», исследованиях и программных решениях в плане автоматизации вывоза отходов. Использование систем видеонаблюдения для мониторинга ситуации в «умной среде» региона позволяет анализировать контролируемые параметры в реальном времени.

Результаты. Смоделирована система «умной среды» для задачи по своевременному информированию о необходимости вывоза. Применение аналитики видеонаблюдения в городе Курск дало возможность получить данные в режиме реального времени и визуализацию условий окружающей среды в зоне мониторинга, что позволило региональному оператору принимать решения на основе обработанных данных.

Заключение. Реализация современной концепции «умной среды» для задач контроля уборки ТКО на сегодняшний день является актуальным направлением. Организация работы регионального оператора по обращению с ТКО является процессом, который нуждается в современной информационной поддержке. Для осуществления процесса построения системы «умной среды» используются инфокоммуникационные комплексы и системы передачи данных для отслеживания уровня наполнаемости контейнеров с ТКО.

Ключевые слова: инфокоммуникационная сеть; обработка данных; региональный оператор; персональные данные; информационная модель.

© Александров Д. В., Гуламов А. А., 2025

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

Для цитирования: Александров Д. В., Гуламов А. А. Использование модели видеонаблюдения для системы «умной среды» в организации работы регионального оператора по обращению с твердыми коммунальными отходами // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 3. С. 112–121. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-112-121>

Поступила в редакцию 15.07.2025

Подписана в печать 12.08.2025

Опубликована 30.09.2025

Using a video surveillance model for the system "smart environment" in the organization of the work of the regional operator for the management of municipal solid waste

Dmitry V. Aleksandrov¹ ✉, Alisher A. Gulamov¹

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

✉ e-mail: di46ma@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to study the concept of a "smart environment" and design a video surveillance system to address the issue of timely removal of municipal solid waste (MSW) by a regional operator. The function of these technologies is to monitor the environment in real time 24 hours a day, seven days a week. The implementation of a "smart environment" will bring benefits and improve the quality of life of the urban community. The purpose of the "smart environment" is to manage and create a sustainable environment that ensures the maximum use of technologies for the benefit of the population.

Methods. The research methods are based on the Decree of the Government of the Russian Federation of 20.05.2022 No. 913 "on approval of the regulation on the federal state information system for accounting of municipal solid waste", research and software solutions in terms of automation of waste removal. The use of video surveillance systems to monitor the situation in the "smart environment" of the region allows you to analyze the controlled parameters in real time.

Results. A "smart environment" system was modeled for the task of timely notification of the need for removal (MSW). The use of video surveillance analytics in the city of Kursk made it possible to obtain real-time data and visualize environmental conditions in the monitoring zone, which allowed the regional operator to make decisions based on the processed data.

Conclusion. The implementation of the modern concept of a "smart environment" for the tasks of monitoring the removal of solid municipal waste is currently a relevant area. The organization of the work of the regional operator for the handling of solid municipal waste is a process that requires modern information support. To implement the process of building a system of "smart environments", infocommunication kits and data transmission systems are used to track the level of filling of containers with solid municipal waste.

Keywords: infocommunication network; data processing; regional operator; personal data; information model.

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

For citation: Aleksandrov D.V., Gulamov A.A. Using a video surveillance model for the system "smart environment" in the organization of the work of the regional operator for the management of municipal solid waste. *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(3):112–121. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-112-121>

Received 15.07.2025

Accepted 12.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

Одним из столпов системы «умный город» является система окружающая «умная среда», обеспечивающая комфорт, устойчивость ресурсов и защиту окружающей среды для общества [1]. «Умная среда» – это система управления городом, основанная на защите окружающей среды, разработанная с использованием исключительных возможностей технологий [2]. Легкость, с которой правительство может отслеживать и получать доступ к экологическим условиям на своей территории, позволит ему принимать решения и проводить политику в соответствии с реальными условиями. «Умная среда» при правильном управлении может помочь справиться с кризисами, стихийными бедствиями, а также организовать городскую среду [3]. Технология видеоаналитики является важнейшим компонентом систем регионального видеонаблюдения. Для регистрации и идентификации различных явлений, которые фиксируют камеры, таких как уровень воды в реке, скорость течения реки и наличие луж на дорогах, интеграция сенсорных технологий имеет важное значение [4]. Использование технологий видеоаналитики может облегчить правительству борьбу с мусором на городских дорогах, парках,

улицах и смягчить последствия его влияния на экологию [5].

Это явление можно объяснить тем, что данный технологический процесс облегчает оперативное и точное представление соответствующей информации региональному оператору по вывозу мусора и коммунальным службам, позволяя им оперативно и точно формулировать решения [6].

Анализ данных видеорегистрации в контролируемых областях и их отображение в обработанном виде является информационно-аналитическим обеспечением на базе современных информационно-телекоммуникационных систем для принятия решений [7]. Мусор в парках, придомовых территориях, лесах, на дорогах – распространенная проблема, с которой сталкиваются в любом регионе России [8]. Применение аналитики видеонаблюдения предоставляет информацию для оперативного реагирования на возникающие проблемы по загрязненности окружающей среды твердыми коммунальными и иными отходами для принятия решений по организации уборки территории и установки предупреждающих знаков [9]. Проектируемая аналитическая модель видеонаблюдения должна оперативно анализировать события, записанные камерой, путем преобразования видеоданных в числовые данные для

информационно-аналитического обеспечения процесса принятия решения [10].

Материалы и методы

Система раннего оповещения предполагает предоставление информации для оперативного реагирования на

несанкционированные свалки или превышение уровня заполняемости контейнеров для сбора ТКО [11]. Результаты работы системы раннего оповещения с видеонаблюдением и аналитикой видеонаблюдения на некоторых контейнерных площадках в течение 24 часов представлены ниже (рис. 1).

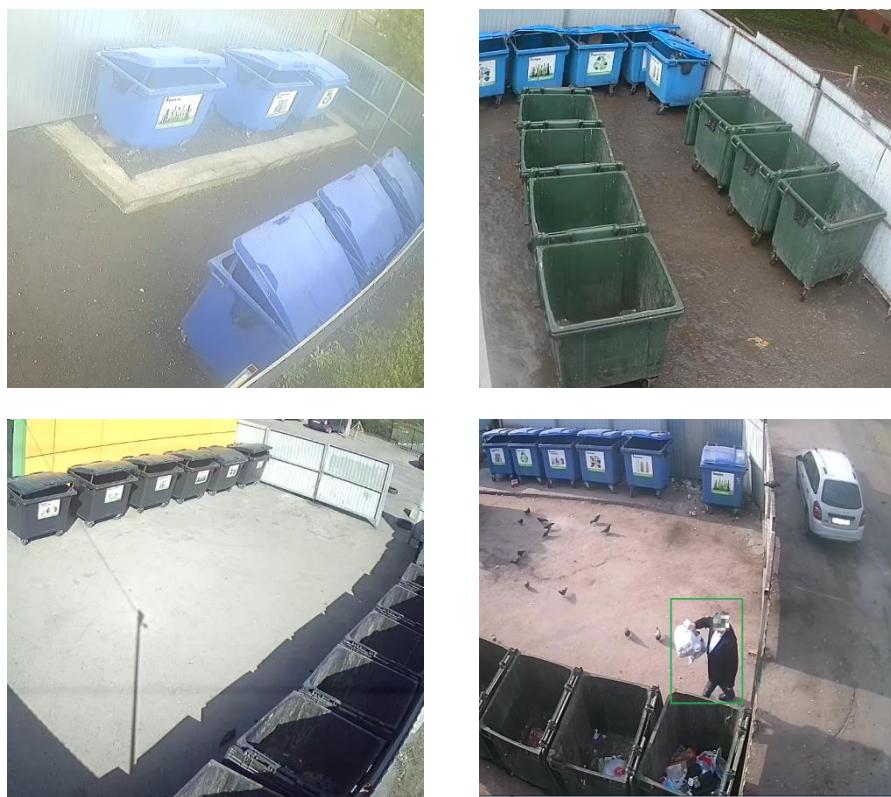


Рис. 1. Контейнерные площадки для сбора ТКО и вторсырья [12]

Fig. 1. Container sites for collecting MSW and recyclables [12]

Система анализирует объект, который подходит к контейнеру для сбора ТКО или для сбора вторсырья, и если выбранный объект выбрасывает мусор или вторсырье, проверяет визуально уровень заполнения данного контейнера [13]. Если заполнено более половины контейнеров, посыпается сигнал диспетчеру о необходимости обращения внимания на данную площадку для

своевременного вывоза вторсырья и ТКО с неё [14].

Диспетчер обязан быстро реагировать и контролировать оперативное проведение оценки конкретной ситуации [15]. Кроме того, в случае несанкционированного вывоза мусора необходимо оповестить органы, которые отвечают за защиту окружающей среды [16].

Данные с камер видеонаблюдения передаются на сервер организации для анализа и обработки [17]. На рисунке 2

представлена схема передачи и обработки данных видеонаблюдения для регионального оператора ТКО [18].

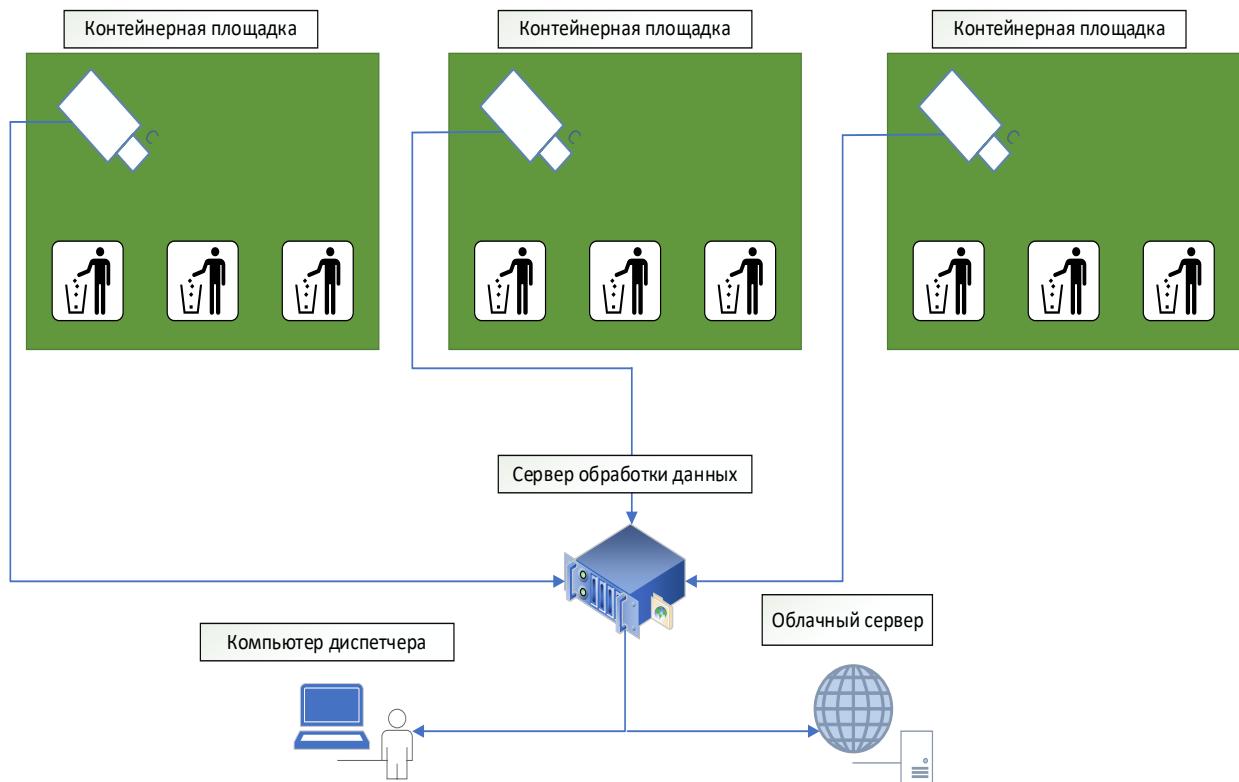


Рис. 2. Схема передачи и обработки данных видеонаблюдения для регионального оператора ТКО

Fig. 2. Scheme of transmission and processing of video surveillance data for a regional MSW operator

В данной схеме приведена модель передачи данных с камер видеонаблюдения на контейнерных площадках на сервер обработки данных внутри организации регионального оператора [19]. Для подключения камеры к серверу можно выделить статический IP-адрес для каждой из точек. После обработки полученной информации на компьютер диспетчера или иного уполномоченного лица будут поступать все необходимые данные для оперативного мониторинга загруженности контейнеров ТКО. В облачный сервер копируется часть

данных для хранения и возможной отправки в контролирующие органы по запросу или же ППК РЕО (публично-правовая компания «Российский экологический оператор»).

На рисунке 3 показана диаграмма наполняемости контейнеров на основе анализа данных системы видеонаблюдения.

Данные наполняемости площадки ТКО передавались в диспетчерский отдел регионального оператора по вызову ТКО для оперативного реагирования на сложившуюся ситуацию [20].



Рис. 3. Диаграмма наполняемости контейнеров на основе анализа данных системы видеонаблюдения

Fig. 3. Diagram of container filling based on analysis of video surveillance system data

Внедрение аналитики видеонаблюдения для создания «умной среды» в г. Курске привело к ряду проблем, одной из которых была труднодоступность подведения электропитания для видеокамер на некоторые контейнерные площадки и места несанкционированных свалок мусора. В связи с этим использовались более дорогие и менее практические камеры в условиях зимнего климата, а именно камеры на солнечной батарее. Данное решение может показаться нецелесообразным, однако внедрение аналитики видеонаблюдения было необходимо для наглядного представления данных о накоплении мусора с городских несанкционированных свалок. Накопление мусора в городских районах в зимний период послужило созданию неблагоприятной городской

среды к весне после ухода снега и загрязнению окружающей среды.

Результаты и их обсуждение

В ходе работы были выявлены проблемы, с которыми сталкивается региональный оператор при установке систем видеонаблюдения и развитии системы «умный город» посредством применения аналитики видеонаблюдения. При этом в г. Курске интеграция видеонаблюдения находится на начальной стадии, и аналитическая система была установлена только в определенных местах. Данная система производила измерения, и эффективность мониторинга решала такие проблемы, как заполняемость контейнеров ТКО и образование несанкционированных свалок.

Выводы

Концепция «умной среды» предполагает использование технологий, таких как аналитика видеонаблюдения, для интеграции данных и управления условиями окружающей среды. Это позволило бы улучшить качество жизни городского сообщества и способность справляться со стихийными бедствиями. Использование

аналитики видеонаблюдения в г. Курске дает потенциальные преимущества для контроля над окружающей средой и борьбой с несанкционированными свалками. Для полной реализации потенциала «умной среды» и преодоления проблем, с которыми сталкиваются города в этот переходный период, необходимы дальнейшие исследования и разработки.

Список литературы

1. Путинцева Н. А. Роль региональных операторов в организации раздельного накопления отходов // Петербургский экономический журнал. 2020. Т. 1, № 2. С. 101–111.
2. Буданов И. А. Состояние системы утилизации отходов и использования вторичных ресурсов в РФ // Научные труды: Институт народно-хозяйственного прогнозирования РАН. 2019. № 17. С. 119–142.
3. Гольцова И. А., Гуламов А. А. Информационное обеспечение участка железной дороги // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 7, № 2. С. 6–11.
4. Чекалин В. С. Обзор мер по организации управления отходами в России как фактора повышения ее энергоэффективности // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2018. Т. 4, № 112. С. 68–105.
5. Багдасарян В. А. Проблемы экологической безопасности в сфере утилизации бытовых и промышленных отходов в окружающую среду // Вестник экспертного совета. 2022. № 2(29). С. 74–82.
6. Марьев В. А., Смирнова Т. Г. Формирование экотехнопарков в условиях РФ // Твердые бытовые отходы. 2017. № 3. С. 21–23.
7. Титова О. В. Разработка предложений по совершенствованию утилизации и переработки бытовых отходов на примере ООО «Капиталстрой» г. Липецк // Вестник Московского финансово-юридического университета МФЮА. 2022. № 2. С. 218–229.
8. Комков В. И. Системная организация обращения с отходами автотранспорта в регионах // Твердые бытовые отходы. 2022. № 1. С. 19–21.
9. Чернышин П. В. B2C-сервис «Агрегатор вывоза строительных отходов» // Reduce reuse recycle. 2020. Т. 3, № 15. С. 40–41.
10. Левакова И.В., Арустамов Э.А. Проблемы реализации программы комплексной системы обращения с твердыми коммунальными отходами // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». 2021. Т. 8, № 1. С. 1–8.

11. Левакова И. В., Арустамов Э. А. О необходимости комплексного подхода к реализации программы утилизации отходов в год экологии РФ (на примере г. Москва) // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2017. № 3. С. 91–98.
12. Романенко И. И., Петровнина И. Н., Кондратьев К. А. Автоматизация систем сбора и переработки твердых бытовых отходов // Форум молодых ученых. 2019. Т. 29, № 1. С. 52–57.
13. Проблема раздельного сбора твердых бытовых отходов в России / В. О. Ноткина, А. И. Слободенюк, В. С. Невиницына, Ю. А. Осипкина // Студенческая наука: актуальные вопросы, достижения инновации. Пенза, 17 августа 2021 года: сборник статей III Международной научно-практической конференции. Пенза: Наука и Просвещение, 2021. С. 29–31.
14. Конарев Д. И., Гуламов А. А. Синтез архитектуры нейронной сети для распознавания образов морских судов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. Т. 24, № 1. С. 100–105
15. Конарев Д. И., Гуламов А. А. Синтез архитектуры нейронной сети для распознавания образов судов на базе технологии предварительного обучения // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2022. Т. 10, № 2(37). С. 19. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.37.2.011>
16. Бузько И. Т. Применение цифровых радиорелейных систем в современном мире // Science and technology research. Петрозаводск, 24 февраля 2022 года: сборник статей III Международной научно-практической конференции. Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И. И.), 2022. С. 41–47.
17. Касапов А. В., Заиченко Г. В. Утилизация и автоматизация переработки бытовых отходов // Юный ученый. 2017. № 3-1(12). С. 31–36.
18. Рубинов В. В. Оценка динамики роста отходов в Санкт-Петербурге // Системный анализ и логистика. 2020. Т. 3, № 25. С. 3–8.
19. Рубинов В. В. Использование математических моделей теории систем массового обслуживания для описания и анализа систем работы с отходами в мегаполисах // Системный анализ и логистика 2021. Т. 4, № 34. С. 28–35.
20. Рубинов В. В., Фетисов В. А. Разработка модели оптимизации потоков ТКО на уровне маршрутов // Системный анализ и логистика. 2021. Т. 30, № 4. С. 68–75.

References

1. Puttitntseva N.A. The role of regional operators in the organization of separate waste accumulation. *Peterburgskii ekonomicheskii zhurnal = St. Petersburg Economic Journal*. 2020;1(2):101–111. (In Russ.)
2. Budanov I.A. The state of the waste disposal system and the use of secondary resources in the Russian Federation. *Nauchnye trudy: Institut narodno-khozyaistvennogo prognozirovaniya*

RAN = Scientific Proceedings: Institute of Economic Forecasting RAS. 2019;17:119–142.
(In Russ.)

3. Goltsova I.A., Gulamov A.A. Information support of the railway section. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2017;7(2):6–11. (In Russ.)

4. Chekalin V.S. Review of waste management measures in Russia as a factor in improving its energy efficiency. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta = Proceedings of the St. Petersburg State University of Economics.* 2018;4(112):68–105. (In Russ.)

5. Bagdasaryan V.A. Problems of environmental safety in the field of disposal of household and industrial waste into the environment. *Vestnik ekspertnogo soveta = Bulletin of the Expert Council.* 2022;2(29):74–82. (In Russ.)

6. Maryev V.A., Smirnova T.G. Formation of ecotechnoparks in the conditions of the Russian Federation. *Tverdye bytovye otkhody = Solid Household Waste.* 2017;(3):21–23. (In Russ.)

7. Titova O.V. Development of proposals for improving the disposal and processing of household waste using the example of Kapatalstroy LLC, Lipetsk. *Vestnik Moskovskogo finansovo-yuridicheskogo universiteta MFYuA = Bulletin of the Moscow University of Finance and Law, MFUA.* 2022;(2):218–229. (In Russ.)

8. Komkov V.I. System organization of waste management of motor transport in the regions. *Tverdye bytovye otkhody = Solid Household Waste.* 2022;(1):19–21. (In Russ.)

9. Chernyshin P.V. B2C service "Aggregator of construction waste removal". *Reduce Reuse Recycle.* 2020;3(15):40–41. (In Russ.)

10. Levakova I.V., Arustamov E.A. Problems of implementation of the program of the integrated system of solid municipal waste management. *Internet-zhurnal "Otkhody i resursy" = Online Magazine "Waste and Resources".* 2021;8(1):1–8. (In Russ.)

11. Levakova I.V., Arustamov E.A. On the need for an integrated approach to the implementation of the waste disposal program in the Year of Ecology of the Russian Federation (on the example of Moscow). *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki = Bulletin of the Moscow State Regional University. Series: Natural Sciences.* 2017;(3):91–98. (In Russ.)

12. Romanenko I. I., Petrovnina I. N., Kondratiev K. A. Automation of systems for collecting and processing solid household waste. *Forum molodykh uchenykh = Forum of Young Scientists.* 2019;29(1):52–57. (In Russ.)

13. Notkina V.O., Slobodenyuk A.I., Nevinitsyna V.S., Osipkina Yu.A. The problem of separate collection of solid household waste in Russia. In: *Studencheskaya nauka: aktual'nye voprosy, dostizheniya innovatsii. Penza, 17 avgusta 2021 goda: sbornik statei III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Student science: current issues, achievements, innovations. Penza, 17 August 2021: Collection of articles of the III International Scientific and Practical Conference.* Penza: Nauka i Prosveshchenie; 2021. P. 29–31. (In Russ.)

14. Konarev D.I., Gulamov A.A. Synthesis of neural network architecture for cognition of images of marine vessels. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2020;24(1):100–105. (In Russ.)
15. Konarev D.I., Gulamov A.A. Synthesis of neural network architecture for ship image recognition based on prelearning technology. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization, and Information Technology.* 2022;10(2):19. (In Russ.) <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.37.2.011>
16. Buzko I.T. Application of digital radio relay systems in the modern world. In: *Science and technology research. Petrozavodsk, 24 fevralya 2022 goda: sbornik statei III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Science and technology research. Petrozavodsk, 24 February 2022: Collection of articles of the III International Scientific and Practical Conference.* Petrozavodsk: Mezhdunarodnyi tsentr nauchnogo partnerstva «Novaya Nauka» (IP Ivanovskaya I.I.); 2022. P. 41–47. (In Russ.)
17. Kasapov A.V., Zaichenko G.V. Utilization and automation of household waste processing. *Yunyi uchenyi = Young Scientist.* 2017;(3-1):31–36. (In Russ.)
18. Rubinov V.V. Assessment of waste growth dynamics in St. Petersburg. *Sistemnyi analiz i logistika = System Analysis and Logistics.* 2020;3(25):3–8. (In Russ.)
19. Rubinov V.V. The use of mathematical models of the theory of mass maintenance systems for the description and analysis of waste management systems in megacities. *Sistemnyi analiz i logistika = System Analysis and Logistics.* 2021;4(34):28–35. (In Russ.)
20. Rubinov V.V., Fetisov V.A. Development of a model for optimizing MSW flows at the route level. *Sistemnyi analiz i logistika = System Analysis and Logistics.* 2021;30(4):68–75. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Александров Дмитрий Владимирович,
аспирант, Юго-Западный государственный
университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: di46ma@mail.ru,
ORCID: 0009-0005-3456-2786

Dmitry V. Alexandrov, Postgraduate,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: di46ma@mail.ru,
ORCID: 0009-0005-3456-2786

Гуламов Алишер Абдумаликович,
доктор физико-математических наук,
доцент, профессор, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: profgulamov@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-9334-6710

Alisher A. Gulamov, Doctor of Sciences
(Physics and Mathematics), Associate Professor,
Professor, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: profgulamov@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-9334-6710

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-122-141>

УДК 004

Оценка точности методов контроля частоты ложных срабатываний при аннотации спектра *de novo*

М. М. Тевяшов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный экономический университет
наб. канала Грибоедова, д. 30-32, г. Санкт-Петербург 191023, Российская Федерация

✉ e-mail: tukaramm@yandex.ru

Резюме

Цель – сравнение подходов на основе машинного обучения (*deep learning*) и классических методов по качеству аннотации масс-спектров в условиях больших данных, а также выявление оптимального сценария их интеграции.

Методы. Исследование базируется на использовании набора данных PXD004452, содержащего 2,5 млн уникальных пептидов.

Разработана схема взаимодействия на основе Python/TensorFlow/PyTorch, который обеспечивает параллельную обработку пептидных спектров на GPU-клUSTERе. Использованы следующие этапы: фильтрация топ-150 пиков по интенсивности; генерация теоретических В-/Ү-ионов с учетом модификаций; предсказание пептидов (*PepNet* – сверточная+рекуррентная сеть; *Tide-search* – индексная перехеширующая стратегия). Метрики: количества совпадений, дельта-масса, расстояние Левенштейна, ROC-кривые, распределение ошибок.

Результаты. *PepNet* требует значительных вычислительных ресурсов, при этом качество предсказаний уступает *Tide-search*, особенно на длинных пептидах и модификациях (~среднее совпадение: 4,2 пика vs 9,7; $p < 0,001$). Однако *PepNet* лучше показывает себя при тех спектрах, где в database search отсутствуют релевантные последовательности, демонстрируя важную способность выявлять *novel*-пептиды. Распределение расстояния Левенштейна: ~30% – полное совпадение (0); ~52% – небольшое отклонение (1–5); остальное – значительные расхождения (>5).

Заключение. Метод *deep learning* (*PepNet*) демонстрирует перспективы, но без интеграции с database search уступает по точности.

Предлагается гибридная архитектура: *pep-tagging* через *PepNet*, затем уточнение и верификация через database search. Такой конвейер на больших данных позволит сочетать открытие новых пептидов (*de novo*) и высокую достоверность идентификации (database search).

Ключевые слова: машинное обучение; масс-спектрометрия; расстояние Левенштейна; спектры.

Благодарности: Выражаем благодарность заведующему научно-учебной лабораторией искусственного интеллекта для вычислительной биологии НИУ ВШЭ доктору наук Кертес-Фаркаш Аттила за формирование методологии исследования и предоставление данных для статьи.

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

Для цитирования: Тевяшов М. М. Оценка точности методов контроля частоты ложных срабатываний при аннотации спектра *de novo* // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 3. С. 122–141. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-122-141>

Поступила в редакцию 21.07.2025

Подписана в печать 20.08.2025

Опубликована 30.09.2025

© Тевяшов М. М., 2025

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025;15(3):122–141

Evaluation of the accuracy of false alarm frequency control methods for de novo spectrum

Mikhail M. Tevyashov¹ 

¹ Saint Petersburg State University of Economics
30-32 Griboedov canal Emb., St. Petersburg 191023, Russian Federation

 e-mail: tukaramm@yandex.ru

Abstract

The purpose of the research is comparison of machine learning-based approaches (deep learning) and classical methods for mass spectrum annotation in big data conditions, as well as identification of the optimal scenario for their integration.

Methods. The study is based on the PXD004452 dataset containing 2,5 million unique peptides. An interaction scheme based on Python/TensorFlow/PyTorch has been developed, which provides parallel processing of peptide spectra on a GPU cluster. The following steps were used: filtering of the top 150 peaks by intensity; generation of theoretical B-/Y-ions, taking into account modifications; prediction of peptides (PepNet – convolutional+recurrent network; Tide-search – index-shifting strategy). Metrics: number of matches, delta mass, Levenshtein distance, ROC curves, error distribution.

Results. PepNet requires significant computational resources, while the prediction quality is inferior to Tide-search, especially for long peptides and modifications (~average match: 4,2 pi vs 9,7; p < 0,001). However, PepNet performs better in those spectra where relevant sequences are missing in the database search, demonstrating an important ability to identify novel peptides. Levenshtein distance distribution: ~30% is a complete match (0); ~52% is a small deviation (1-5); the rest is significant discrepancies (>5).

Conclusions. The deep learning (PepNet) method shows promise, but without integration with database search, it is inferior in accuracy. A hybrid architecture is proposed: pep-tagging via PepNet, followed by refinement and verification via database search. Such a big data pipeline will combine the discovery of new peptides (de novo) and high identification reliability (database search).

Keywords: machine learning; mass spectrometry; Levenstein distance; spectra.

Acknowledgements: We would like to thank Dr. Kertes-Farkash Attila, Head of the HSE Scientific and Educational Laboratory of Artificial Intelligence for Computational Biology, for developing the research methodology and providing data for the article.

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

For citation: Tevyashov M.M. 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(3):122–141. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-122-141>

Received 21.07.2025

Accepted 20.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

Масс-спектрометрия играет решающую роль в протеомике, особенно в

определении точного аминокислотного состава пептидов. Существует два основных подхода к интерпретации

спектров: database search и de novo секвенирование.

Первый подход основан на сравнении экспериментальных спектров с теоретически предсказанными спектрами известных пептидов. Второй подход (de novo) пытается реконструировать аминокислотную последовательность непосредственно из спектра без предварительного знания последовательности в базе данных. В ходе работы было решено сравнить de novo и database search, поскольку оба подхода имеют свои сильные и слабые стороны [1].

Поиск в базе данных – это сравнение экспериментальных данных, полученных в результате анализа образца белка с помощью масс-спектрометрии, с теоретическими спектрами, смоделированными на компьютере на основе известных последовательностей аминокислот. Поиск в базе данных часто более точен, но зависит от полноты и релевантности базы данных [2].

Секвенирование пептидов de novo – это метод реконструкции аминокислотной последовательности пептида непосредственно из его тандемного масс-спектра (MS/MS) без обращения к базам данных белков. В отличие от традиционного поиска, который осуществляется поиск совпадений между экспериментальным спектром и теоретическими спектрами известных белков, секвенирование de novo полностью полагается на интерпретацию фрагментных ионов, полученных при фрагментации пептида в масс-спектрометре. Процесс основан на

том факте, что при фрагментации пептида образуются ионы определенного типа (чаще всего b- и y-ионы), которые соответствуют последовательным разрывам связей аминокислот. Анализируя массу ионов [3], можно определить, какие аминокислоты находятся в последовательности и в каком порядке [4].

Методы de novo не требуют применения базы данных и позволяют находить новые или измененные пептиды, не представленные в референтных базах данных, но подвержены ошибкам в интерпретации спектров, но страдают от низкой точности и плохого качества спектра, неполной фрагментации, длинных пептидов, пропущенных ионов, перекрывающихся пиков, шумов [5].

Основная идея работы заключается в опровержении либо доказательстве гипотезы о том, что метод de novo менее точен в своих предсказаниях, чем database search при прямом сравнении. Для этого была выбрана модификация de novo под названием PepNet.

PepNet – это полностью сверточная нейросеть (fully convolutional neural network), специально разработанная для анализа MS/MS-спектров и прямого восстановления аминокислотных последовательностей пептидов. На вход модели поступает спектр, представленный как одномерный вектор: пики m/z бинируются с разрешением ~0,1 Th по диапазону от 0 до 2000 m/z (около 20 000 измерений), после чего нормализуются по максимальной интенсивности. Предварительно из спектра удаляется пиковый

сигнал прекурсора, чтобы исключить его влияние на обучение и предсказание.

Архитектура (рис. 1) состоит из чередующихся temporal convolutional network (TCN) слоёв и down-sampling операций, которые извлекают как глобальные, так и локальные признаки спектра. Получившийся тензор признаков затем проходит через декодер,

который рекурсивно формирует аминокислотную последовательность. Модель обучалась на ~3 млн HCD-спектров из различных библиотек (преимущественно человек), что позволило ей хорошо обобщать разнообразные входные данные, включая спектры нечеловеческих организмов и спектры неотмеченных прекурсоров.

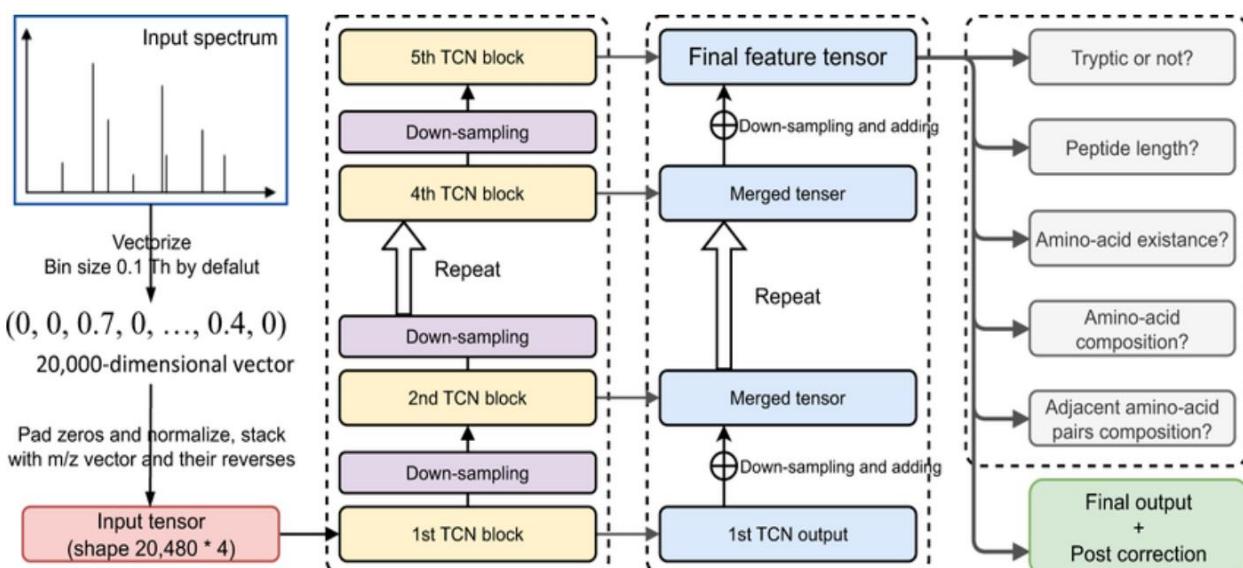


Рис. 1. Схема архитектуры PepNet

Fig. 1. PepNet architecture diagram

По сравнению с другими de novo-системами (PointNovo, DeepNovo) PepNet демонстрирует значительное улучшение точности на уровне полного пептида и на уровне локальных позиций. Он способен секвенировать спектры, которые остаются нераспознанными при использовании database search-методов, что особенно важно для выявления новых, модифицированных или ранее неизвестных пептидов. Кроме того, благодаря эффективной сверточной архитектуре PepNet работает примерно в 3–7 раз быстрее, чем DeepNovo и PointNovo на

GPU, что делает его применимым в обработке масштабных ассемблей протеомных данных.

Эти особенности делают PepNet мощным инструментом для высокоточного de novo секвенирования, особенно в задачах, где отсутствуют полные справочные базы пептидов, например в метапroteомике, исследовании редких белков или иммунопептидомике [5].

В качестве database search метода была выбрана модификация tide-search. Tide – это высокопроизводительная реализация алгоритма SEQUEST, созданная

в рамках проекта Crux, которая значительно ускоряет поиск пептидов в tandem MS-спектрах, сохраняя XCorr-оценки идентичными исходному SEQUEST. Основной рабочий процесс начинается с построения индексированной базы пептидов (через tide-index) из FASTA-файла белков, что позволяет многократно и эффективно переиспользовать индекс при множественных поисках. Затем tide-search обрабатывает спектры (вход в бинарном формате либо через ProteoWizard), сравнивает каждый спектр с теоретическими спектрами кандидатов из базы данных и выдает список PSM (peptide-spectrum matches) с XCorr-оценками и метками результата (target/decoy).

Ввиду оптимизации алгоритма и программной реализации Tide обеспечивает примерно 170-кратное ускорение по сравнению с оригинальным SEQUEST: около 1550 спектров/с на стандартном Xeon-процессоре, тогда как SEQUEST с тем же индексированием обрабатывает лишь около 8,8 спектров/с. Современные улучшения индексации (версия 2023) существенно снизили потребление CPU и RAM, что делает Tide способной обрабатывать очень большие базы данных вместе с учётом посттрансляционных модификаций. Кроме того, Crux включает дополнительные команды для повышения надежности результатов: cascade-search для итеративного поиска по суббазам с более строгим FDR и average target-decoy competition (aTDC) для снижения дисперсии оценки достоверности при работе с редкими пептидами.

Эти особенности делают Tide-search идеальным инструментом для высокоточечного и производительного database search, особенно в крупномасштабных исследованиях, где важны скорость и надежность идентификации пептидов.

В масс-спектрометрии пептидов основным методом получения информации о последовательности является фрагментация. При этом процессе пептид разрывается по пептидным связям, и образуются фрагменты, называемые фрагментными ионами. Из них для интерпретации спектров наиболее важны два типа ионов – В-ионы и Y-ионы. В-ионы возникают при сохранении N-конца пептида, их фрагмент состоит из первых n аминокислот последовательности. Y-ионы возникают при сохранении C-конца пептида, соответственно, их фрагмент состоит из последних n аминокислот [7].

Пример: если пептид = ACDE,
то В-ион 2 = AC и Y-ион 2 = DE.

Для каждого пептида были рассчитаны теоретические В-ионы и Y-ионы, которые соответствуют фрагментам, образующимся при разрыве пептидной связи. Каждый ион имеет свою массу (включая модификации), которая сравнивается с экспериментальными значениями в спектре. Каждая аминокислота имеет свою моноизотопную массу (в дальтонах), и при образовании ионов к этим массам добавляются константы, связанные с типом и зарядом иона.

Формула для вычисления В-ионов:

$$m(b_n) = \sum_{i=1}^n m(AA_i) + \\ + m(\text{N-terminus}) + m(\text{proton}),$$

где $m(AA_i)$ – масса каждой аминокислоты во фрагменте; $m(\text{N-конец}) = 1,0078$ Да (масса протона); $m(\text{ион}) = 0$ (обычно, если не учитывать конкретные фрагменты); потери (например, $-\text{H}_2\text{O}$, $-\text{NH}_3$) также можно учитывать как модификации.

Формула для вычисления Y-ионов:

$$\text{A} = 71,0371; \text{C} = 103,0092; \text{Д} = 115,0269$$

$$\text{H}_2\text{O} = 18,0106 \text{ Протон (H}^+)= 1,0078$$

$$b_1 = 71,0371 + 1,0078 = 72,0449 \text{ Да}$$

$$b_2 = 71,0371 + 103,0092 + 1,0078 = 175,0541 \text{ Да}$$

$$b_3 = 71,0371 + 103,0092 + 115,0269 + 1,0078 = 290,081 \text{ Да}$$

$$y_1 = 115,0269 + 18,0106 + 1,0078 = 134,0453 \text{ Да}$$

$$y_2 = 115,0269 + 103,0092 + 18,0106 + 1,0078 = 237,0545 \text{ Да}$$

$$y_3 = 115,0269 + 103,0092 + 71,0371 + 18,0106 + 1,0078 = 344,0916 \text{ Да}$$

Полученные масс-спектры содержат информацию о тысячах ионов с различной интенсивностью. Однако не все пики предоставляют полезную информацию – спектры могут содержать шум, фоновые сигналы или пики малой интенсивности, не несущие смысловой нагрузки. Для увеличения сигнала и устранения шума было решено для каждого спектра отобрать 150 самых интенсивных пиков. Такая фильтрация позволяет оставить только наиболее вероятных кандидатов на сопоставление теоретически рассчитанных фрагментов.

Далее для каждого теоретического иона ищется ближайший пик из 150

$$m(y_n) = \sum_{i=1}^N m(AA_i) + m(\text{C-terminus}) + \\ + m(\text{H}_2\text{O}) + m(\text{proton}),$$

где $m(AA_i)$ – масса каждой аминокислоты во фрагменте; $m(\text{C-конец}) = 1,0078$ Да (масса протона); $m(\text{ион}) = 0$ (обычно, если не учитывать специфические фрагменты); $m(\text{H}_2\text{O}) = 18,0106$ Да (С-концевой фрагмент включает группы $-\text{OH}$ и $-\text{H}$).

Пример расчета:

Пептид: ACD

лучших экспериментальных пиков (рис. 2). Сопоставление считается успешным, если разница между теоретической и экспериментальной массой не превышает установленного допуска по массе. В данной работе было решено принять допуск $\pm 0,05$ Да (дальтон), что обеспечивает баланс между чувствительностью и специфичностью. Совпадения регистрируются в виде пары (тип иона, номер иона, теоретическая масса, экспериментальная масса, дельта). Если в пептиде присутствуют модификации, то они обязательно учитываются при расчете массы соответствующего иона.

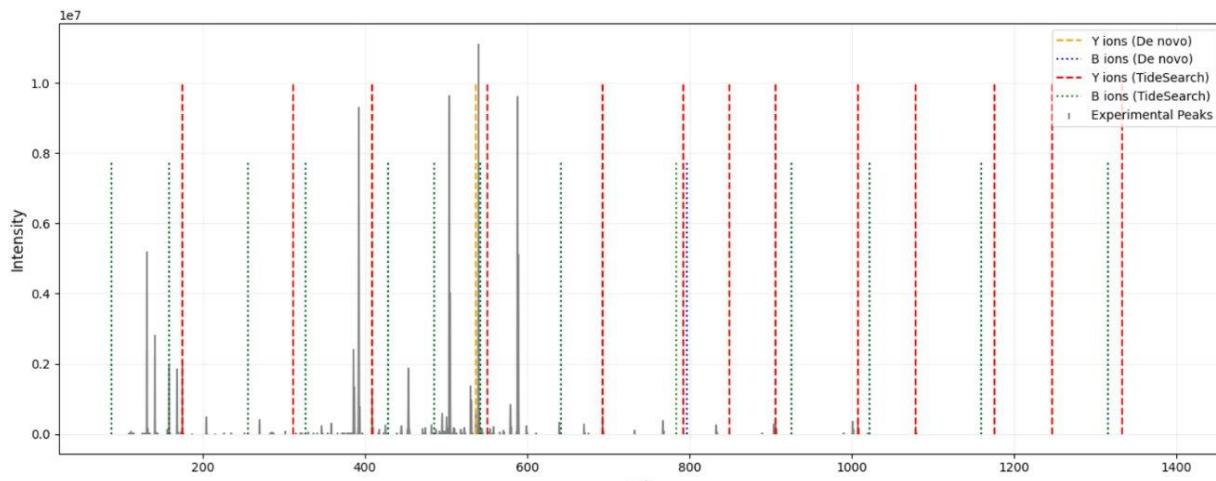


Рис. 2. 150 лучших пиков, а также ионы В и Y, рассчитанные с использованием методов De novo и Tide Search для сканирования 950

Fig. 2. Top 150 peaks, plus B-ions and Y-ions calculated using De novo and Tide Search methods for scan 950

После сравнения теоретических и экспериментальных пиков возникла необходимость количественно оценить, насколько хорошо предсказанные пептиды (например, из секвенирования de novo) соответствуют реальным спектрам. Одной из основных метрик точности является количество совпадений между теоретическими и экспериментальными

пиками (рис. 3). Такие совпадения означают, что фрагмент (В-ион или Y-ион), предсказанный на основе последовательности пептида, фактически наблюдается в экспериментальном спектре. Эти значения позволяют напрямую сравнить, насколько хорошо работает метод de novo по сравнению с database search.

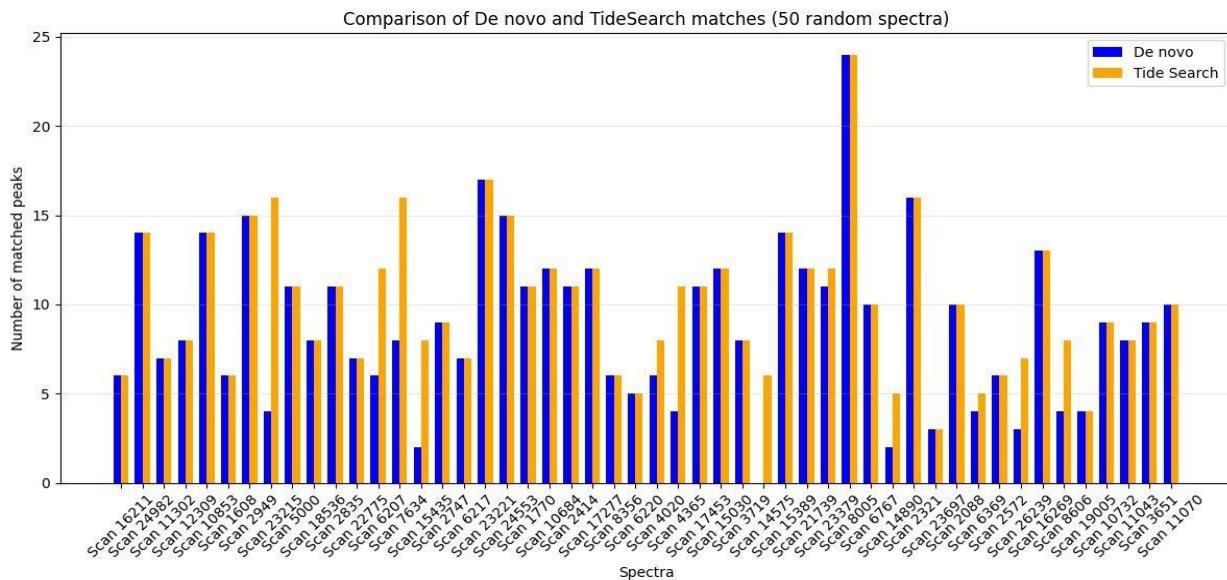


Рис. 3. Сравнение результатов De novo и Tide Search (50 случайных спектров)

Fig. 3. Comparison of De novo and Tide Search matches (50 random spectra)

Гистограммы, полученные на основе совпадений теоретических пиков (рис. 4 и 5), показывают, что для метода tide-search преобладают значения показателя от 6 до 15. В то же время для de novo результат несколько хуже, так как большее значение имеют случаи совпадения только от 1 до 5 пиков, а более высоких результатов — существенно

меньше. Особенно явно видно различие при совмещении гистограмм (гистограмма 6). Определенные выводы можно сделать уже на этом этапе анализа результатов, но было решено углубиться в показатели точности обоих методов, и для этого была выбрана еще одна метрика.

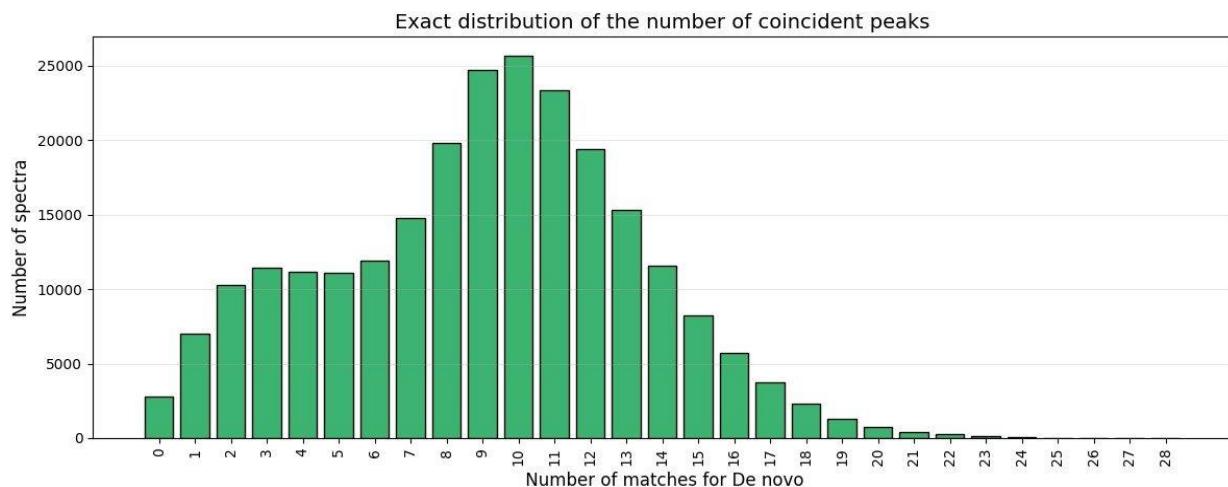


Рис. 4. Совпадения теоретически рассчитанных методом de novo пиков с экспериментальными

Fig. 4. Coincidence of calculation methods of new peaks with experimental ones

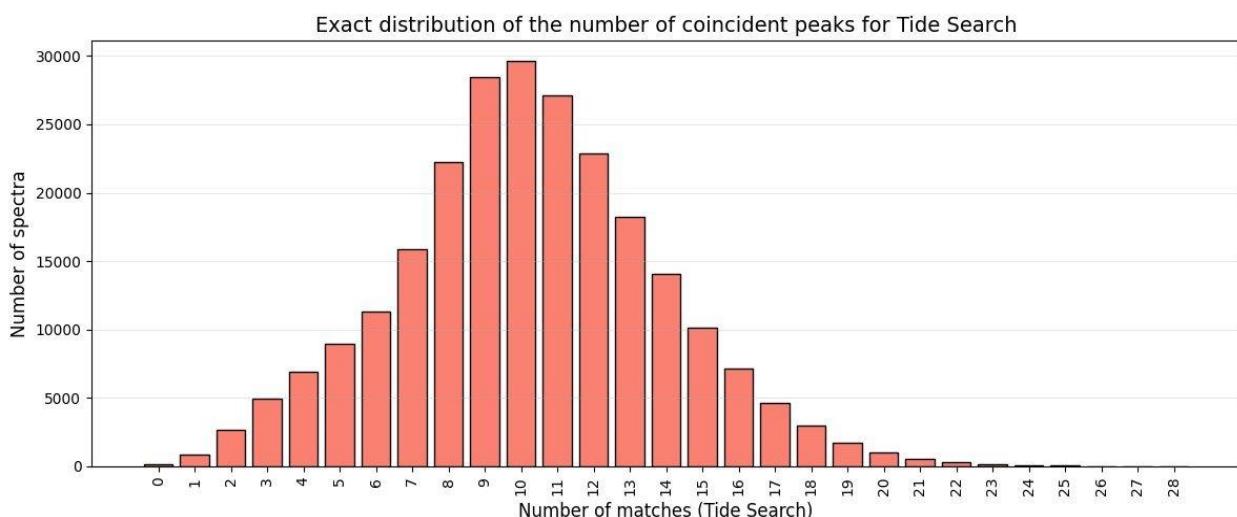


Рис. 5. Совпадения теоретически рассчитанных методом database search пиков с экспериментальными

Fig. 5. Coincidence of theoretically calculated peaks using the database search method with experimental ones

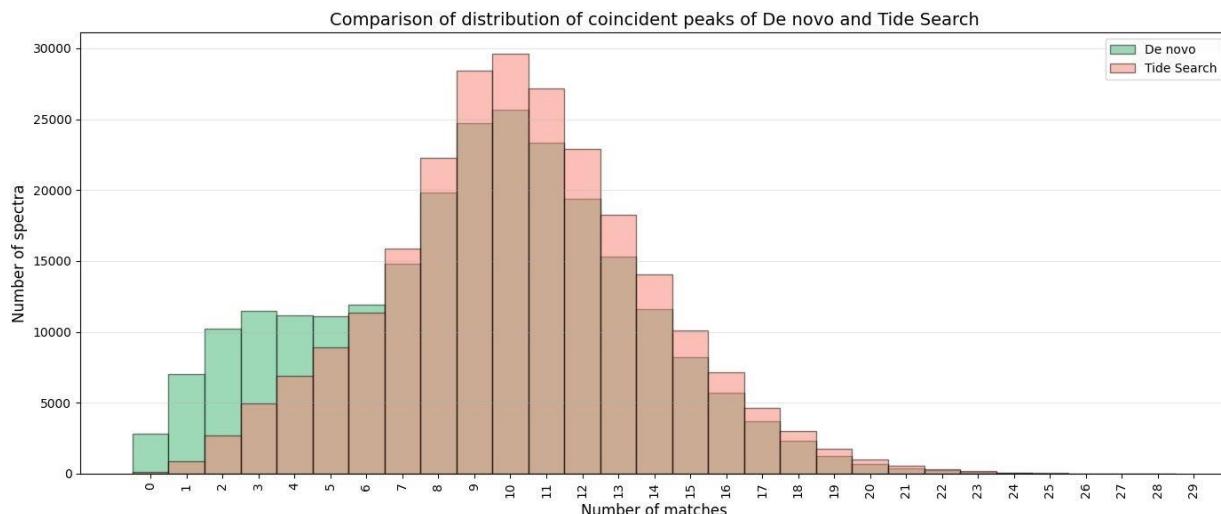


Рис. 6. Сравнение совпадений теоретически рассчитанных и экспериментальных пиков для обоих методов

Fig. 6. Comparison of the coincidences of theoretically calculated and experimental peaks for both methods.

Для более точной оценки различий между предсказанными и референтными последовательностями используется расстояние Левенштейна (также известное как расстояние редактирования) – минимальное количество операций (вставок, делеций, замен), необходимых для преобразования одной строки в другую [8]. В данном случае для преобразования пептида, рассчитанного методом de novo в пептид, предсказанный при помощи database search, т. е. данная метрика отражает то, насколько разными являются предсказанные пептиды (чем больше расстояние Левенштейна, тем больше отличается пептид). Эта метрика особенно полезна при анализе качества секвенирования de novo, где даже небольшие ошибки в аминокислотах могут сильно повлиять на биологическое значение пептида.

Гистограмма с общим распределением по расстоянию Левенштейна (рис. 7) показывает, что подавляющее

большинство значений принадлежит интервалу от 0 до 5. При этом 30% составляют значения 0, т. е. значения полного совпадения пептидов. И еще 52% – это значения от 1 до 5, что в ходе исследования было решено принять за небольшое отклонение.

Отдельно хотелось бы остановиться на нескольких гистограммах (рис. 8–13), где для каждого значения расстояния Левенштейна (от 0 до 42) были отфильтрованы строки, где соответствующее расстояние редактирования между предсказанной и референтной последовательностями было равно этому значению. Таким образом, для каждого значения расстояния были выбраны отдельные подмножества спектров, для которых сравнивалась точность предсказания. Как видно ниже, на каждом изображении одна гистограмма отображает результаты для метода de novo, а другая – для метода database search. По этим гистограммам видно, сколько совпадений

было найдено для каждой группы спектров и насколько точны методы в зависимости от значения расстояния Левенштейна. Ниже приведены 6 гистограмм

из 43, которые достаточно наглядно отображают общую тенденцию, которая прослеживается во всех гистограммах.

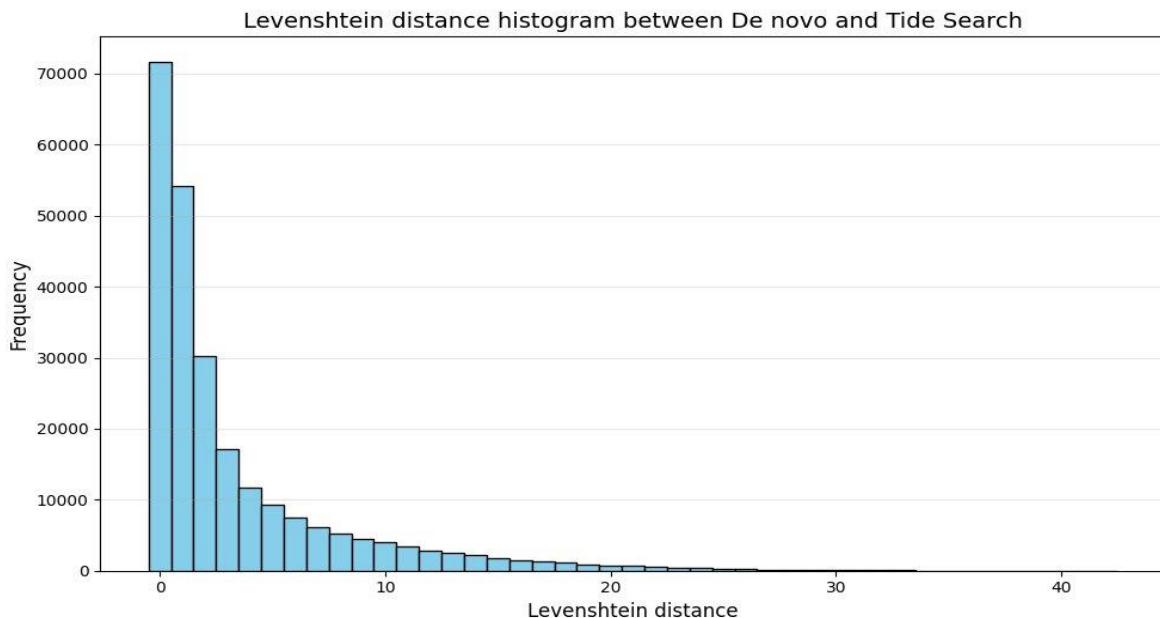


Рис. 7. Распределение спектров по расстоянию Левенштайнa (схожести / различию между пептидами, предсказанными исследуемыми методами)

Fig. 7. Distribution of spectra by the Levenshtein distance (similarity / difference between peptides predicted by the studied methods).

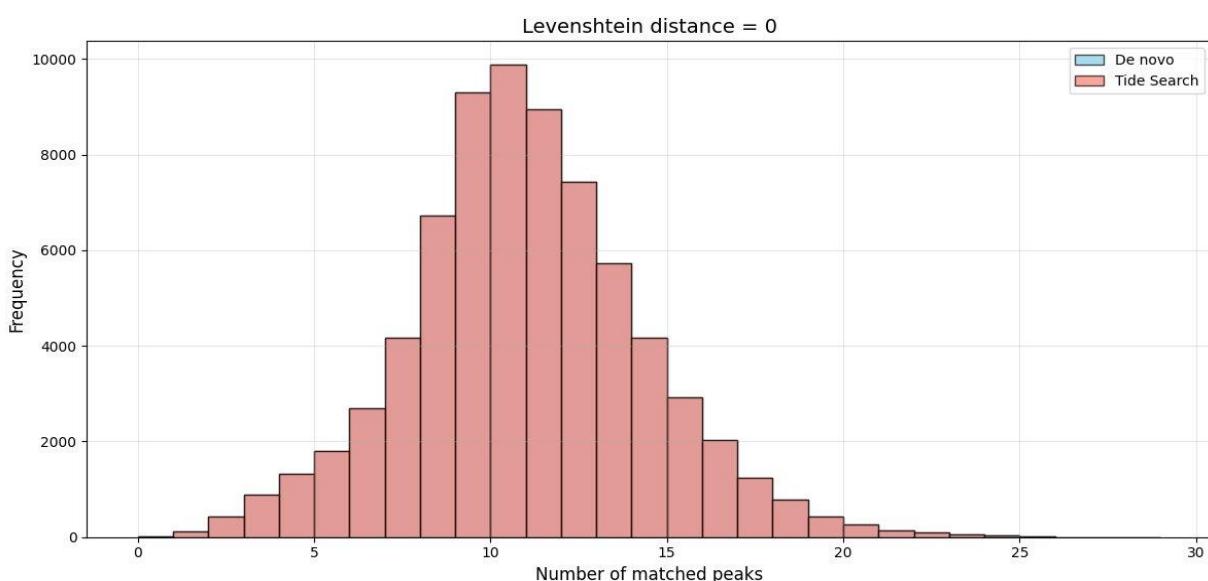


Рис. 8. Сравнение распределения совпадающих пиков для de novo и database search с расстоянием Левенштейна, равным 0

Fig. 8. Comparison of the distribution of matching peaks for de novo and database search with Levenshtein distance equal to 0

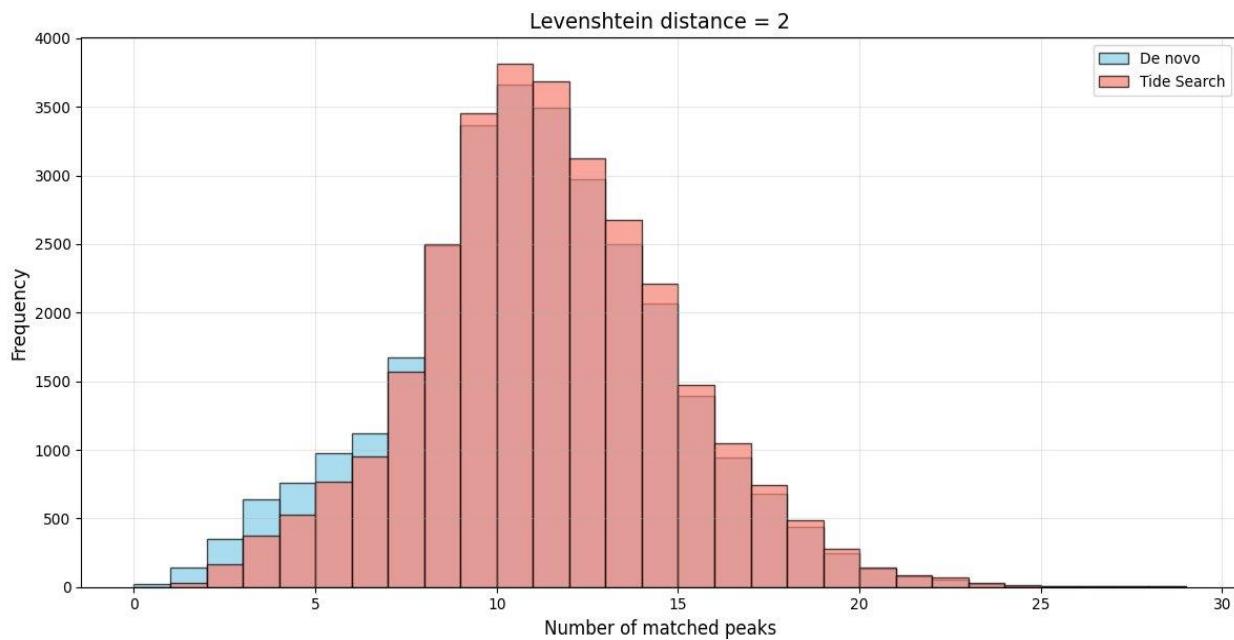


Рис. 9. Сравнение распределения совпадающих пиков для de novo и database search с расстоянием Левенштейна, равным 2

Fig. 9. Comparison of the distribution of matching peaks for de novo and database search with Levenshtein distance equal to 2

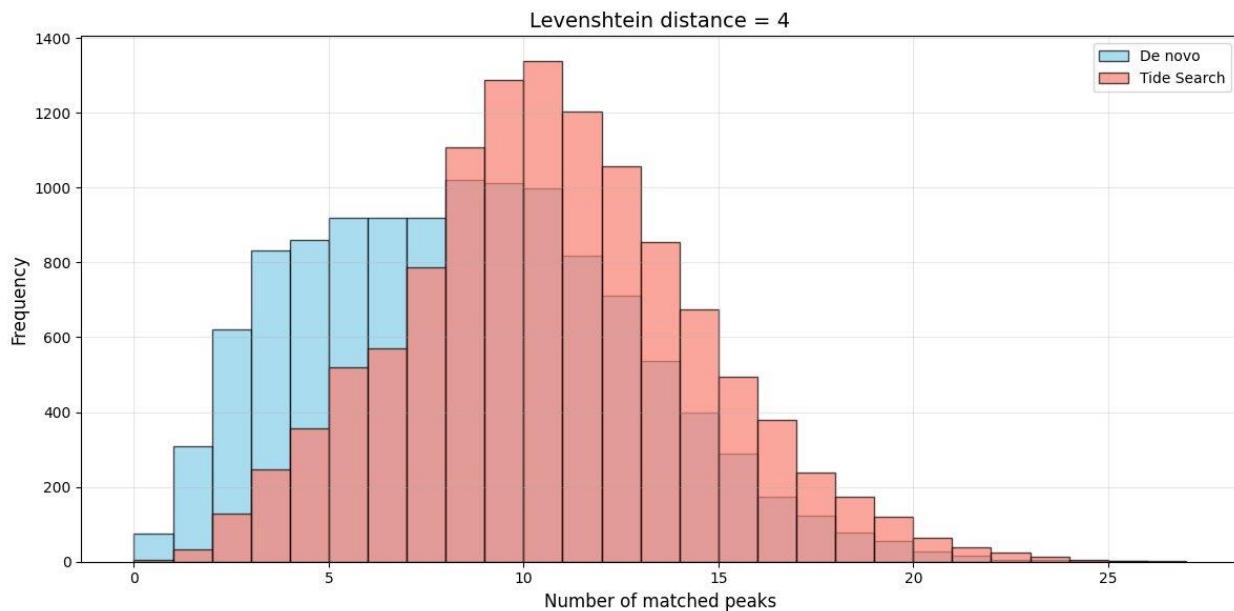


Рис. 10. Сравнение распределения совпадающих пиков для de novo и database search с расстоянием Левенштейна, равным 4

Fig. 10. Comparison of the distribution of matching peaks for de novo and database search with Levenshtein distance equal to 4

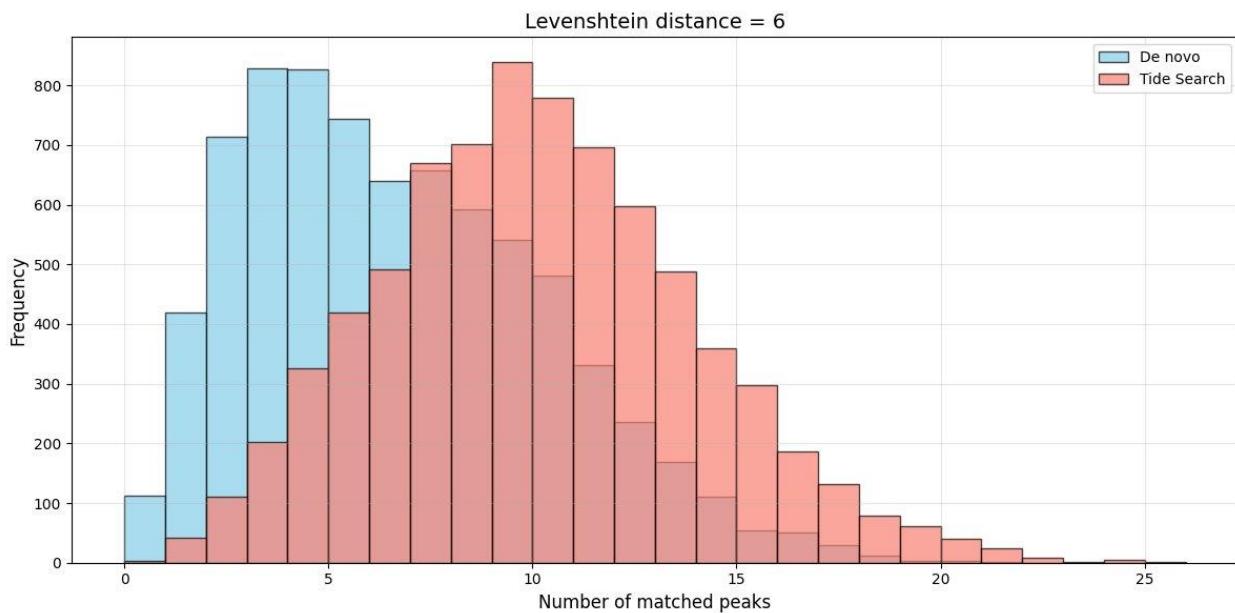


Рис. 11. Сравнение распределения совпадающих пиков для de novo и database search с расстоянием Левенштейна, равным 6

Fig. 11. Comparison of the distribution of matching peaks for de novo and database search with Levenshtein distance equal to 6

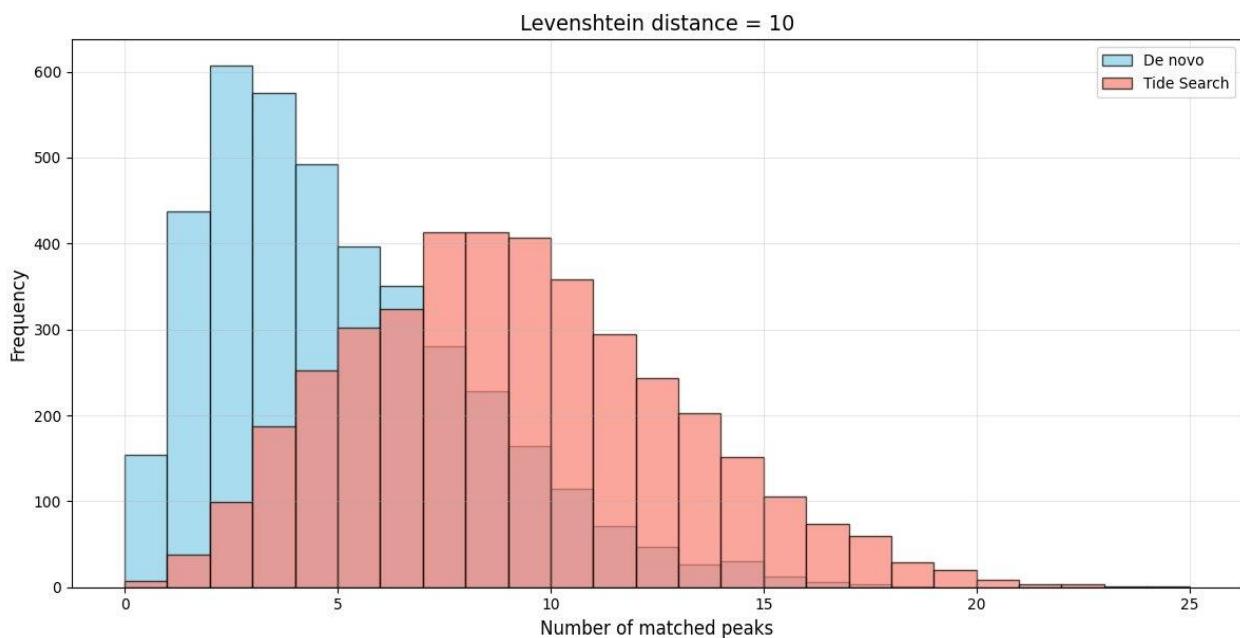


Рис. 12. Сравнение распределения совпадающих пиков для de novo и database search с расстоянием Левенштейна, равным 10

Fig. 12. Comparison of the distribution of matching peaks for de novo and database search with a Levenshtein distance of 10

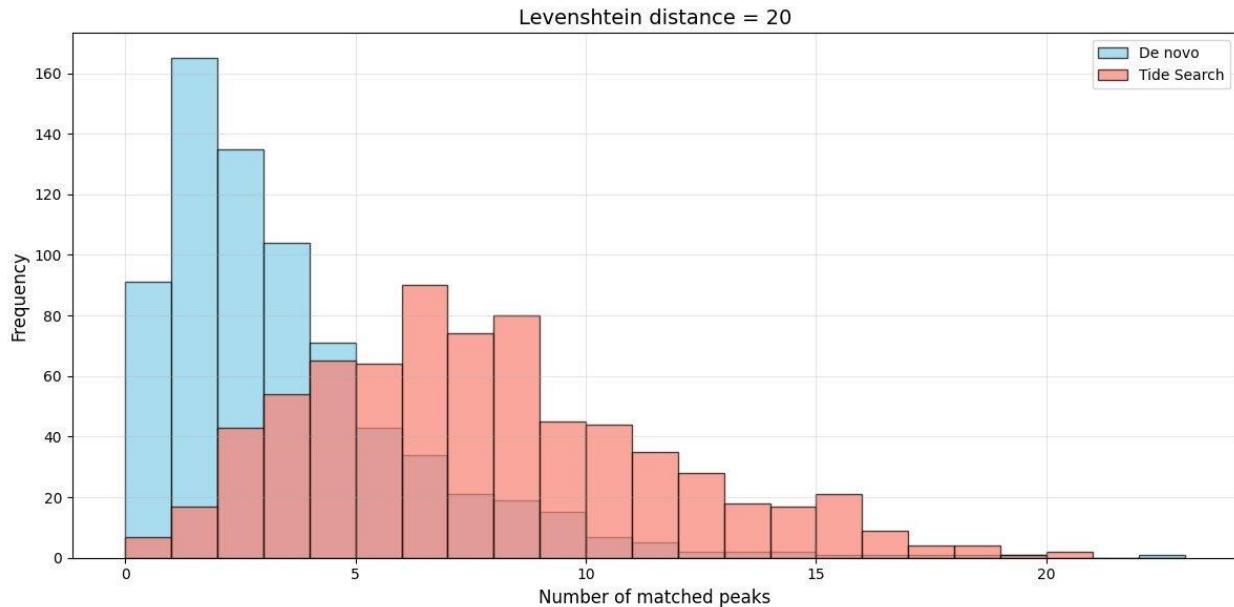


Рис. 13. Сравнение распределения совпадающих пиков для de novo и database search с расстоянием Левенштейна, равным 20

Fig. 13. Comparison of the distribution of matching peaks for de novo and database search with Levenshtein distance equal to 20

Следует отметить, что для одинаковых пептидов (расстояние редактирования 0) гистограмма отдаленно напоминает общую картину, которую мы наблюдали на общей гистограмме совпадений пиков. Однако, чем больше различаются пептиды PepNet и tide-search (чем больше расстояние Левенштейна), тем меньше совпадений теоретических пиков для de novo. Эта тенденция начинает выделяться уже при малых значениях расстояния Левенштейна и становится предельно четкой уже при расстоянии редактирования 4. При расстоянии редактирования 6 гистограмма de novo окончательно смещается влево, а при 10 мы уже видим, что частота пиков de novo стала существенно выше, чем tide-search. Далее этот тренд только продолжает усиливаться.

Из полученных данных можно сделать следующий вывод: чем больше разница в предсказанных пептидах между de novo и tide-search, тем меньше совпадений в теоретических пиках de novo и, как следствие, тем менее точным является результат предсказаний de novo.

Итак, в ходе работы к данным были применены методы de novo и database search. Затем, обработав данные и сравнив их по спектрам, мы вычислили теоретические ионы В и У и сравнили их с топовыми 150 пиками для каждого скана. Для каждого скана были рассчитаны совпадения для de novo и tide-search, а затем для каждого спектра было рассчитано расстояние Левенштейна. Для каждого спектра был рассчитан процент совпадений, что позволило сравнить эффективность двух методов. Проведя ряд тестов, проверок и анализов

полученных данных, а также их визуализацию, мы сделали выводы относительно эффективности *de novo* по сравнению с database search.

Гипотеза подтвердилась: *de novo* действительно показывает худшие результаты, чем database search. Конечно, оба эти метода показывают достаточно удовлетворительную точность. Но также оба эти метода все же нельзя назвать идеальными. Однако, что касается прямого сравнения, то нужно признать, что сам по себе метод *de novo* недостаточно точен и независим. Гораздо разумнее было бы использовать его в комплексе с другими методами, как это уже делают некоторые коллеги.

В последнее время появилась тенденция, заключающаяся в объединении *de novo* секвенирования [9] с другими методами анализа данных (database search, глубокое обучение, DIA, DDA) [10]. Отдельно стоит отметить метод использования *de novo* результатов в качестве тегов для последующего использования их для увеличения точности database search. Такие интеграции преодолевают ограничения каждого отдельного подхода [11] и обеспечивают более высокую точность и чувствительность при идентификации пептидов [12].

Без сомнения, метод *de novo* крайне полезен при работе с неизвестными белками, но, несмотря на это, не стоит полагаться только на этот подход. Гораздо разумнее использовать его как один из нескольких инструментов при работе с пептидами.

После анализа результатов существующих инструментов (Tide и PepNet) мы пришли к идеи построения машинно-обучающейся модели, объединяющей признаки обоих подходов. Целью является:

1. Улучшить точность аннотации масс-спектров.
2. Использовать преимущества базы данных, когда это возможно (как Tide).
3. При этом уметь обобщать на новые, ранее не встречавшиеся пептиды, как это делает PepNet.

Модель должна принимать спектр и выдавать наиболее вероятную пептидную последовательность. В отличие от чисто генеративного подхода (PepNet), мы используем информацию из базы кандидатов, но оцениваем их вероятности с помощью нейросети, а не эвристик (как в Tide).

Таким образом, мы строим трехфазную модель:

1. Кандидатный этап (retrieval stage): используем быстрый алгоритм (возможно модифицированный Tide), чтобы получить топ-N кандидатов из базы данных (например, 100).
2. Ранжирующий этап (ranking stage): каждому кандидату присваивается оценка релевантности с помощью глубокой модели, которая «сравнивает» его с наблюдаемым спектром.
3. Генеративная этап (generative stage): если кандидаты оказываются плохими (confidence низкий), тогда модель пытается сгенерировать *de novo* последовательность, как в PepNet.

Архитектура модели:

1. Спектр-энкодер

Conv1D (или Spectral Transformer) → BiLSTM → Self-Attention

Выход: вектор признаков спектра $S \in \mathbb{R}^d$

2. Пептид-энкодер

Embedding аминокислот → BiLSTM или Transformer

Выход: вектор $P \in \mathbb{R}^d$

3. Matching Head

Вектор сравнения: $[S; P; |S - P|; S * P]$

Multi-layer perceptron (MLP) на 2–3 слоя, с dropout и batch norm

Сигмоида на выходе: вероятность соответствия [13].

Выход: вероятность того, что данный пептид соответствует спектру ($score \in [0,1]$). Этот подход аналогичен Siamese/Matching networks, где задача – оценить релевантность пары (спектр, пептид).

На третьей фазе нашей системы используется нейросетевая модель, обученная различать соответствующие и несоответствующие пары «спектр – пептид». Цель модели – предсказывать вероятность того, что данный пептид сгенерировал данный MS/MS-спектр. Для обучения мы сформировали сбалансированную обучающую выборку, включающую как позитивные, так и негативные примеры [14].

Позитивные примеры брались из реальных экспериментальных данных, где для каждого спектра известен истинный пептид (например, по данным

анnotatedных публичных MS/MS-датасетов, таких как Human Proteome Project, PRIDE и т. д.).

Негативные примерами выступили как случайные пептиды, отобранные из FASTA-базы, не соответствующие данному спектру по массе и другим параметрам, так и пептиды, сгенерированные PepNet на основе другого спектра или с искаженным входом [15].

Каждому примеру соответствовал парный вход: закодированный спектр (вектор масс/интенсивностей) и пептидная последовательность (в one-hot или эмбеддингах). Дополнительно учитывались контекстные признаки: заряд и длина пептида [16], масса, модификации [17].

Модель обучается с использованием бинарной кросс-энтропии:

$$\mathcal{L} = -y \cdot \log(p) - (1 - y) \cdot \log(1 - p),$$

где $y \in \{0,1\}$ – метка класса (match / non-match); p – выход модели.

Используются стандартные техники регуляризации и улучшения обобщающей способности: Dropout, Weight decay, Balanced sampling (1:1 позитивных и негативных примеров), Early stopping по валидационной AUC. Обучение проводилось на GPU, при помощи фреймворков PyTorch и TensorFlow. Размер батча составлял 64–128 примеров, количество эпох – от 5 до 30 в зависимости от объема данных [18].

Точность модели проверялась по отложенной валидационной выборке. Основными метриками качества модели

были выбраны: Top-1 Accuracy (правильно ли угадан лучший кандидат), Top-5 Recall (входит ли правильный пептид в топ-5), Precision N (на лучших N спектрах), ROC-AUC (классификация совпадение/не совпадение), Q-value и FDR после применения пермутационного анализа.

Таблица 1. Метрики Tide search, PepNet и гибридной модели %

Table 1. Metrics of Tide search, PepNet and hybrid model %

Метод	Top-1 Accuracy, %	Top-5 Recall, %	ROC-AUC	FDR, %
Tide search	68	82	0.87	1.1
PepNet	54	68	0.79	1.8
Наша модель-гибрид	76	89	0.91	0.8

На известных пептидах предложенная модель превзошла Tide по оценке совпадений. На неизвестных – приближается к точности PepNet, но избегает генерации невалидных пептидов [19].

Также необходимо отметить, что для оценки устойчивости модели к зашумлённым данным мы провели серию тестов, в которых входные спектры искажались: добавлялся синтетический шум (рандомизированные пики), уменьшалась интенсивность сигналов, либо удалялись слабые пики. Модель сохранила высокую точность (по метрикам Тор-1 и AUC) даже при ухудшении качества спектра, в отличие от базовых методов (например, Tide), у которых точность снижалась более существенно. Это говорит о способности модели обобщать и эффективно извлекать релевантные

Кроме того, мы отдельно измеряли вклад модели в распознавание «трудных» случаев (например, тех, где правильный пептид не входит в top-1 Tide, но появляется среди de novo-кандидатов) [16].

Наша модель-гибрид показывает результаты лучшие, чем каждый из подходов отдельно.

признаки даже из частично повреждённых или неполных данных.

Предложенная модель объединила скорость и детерминизм Tide с гибкостью и обучаемостью PepNet. Гибридная модель показала наиболее высокую точность во всех тестах, что доказывает: такой подход особенно полезен (и, вероятно, необходим) в реальных условиях, где база может быть неполной, а спектры – зашумлены.

Результаты и их обсуждение

Разработанная в рамках настоящего исследования гибридная модель представляет собой многофазную архитектуру, объединяющую лучшие черты двух подходов к интерпретации массспектрометрических данных: глубоких нейронных сетей de novo секвенирования (на примере PepNet) и высокоточной

стратегии поиска по базе данных (на примере Tide-search). Эта модель была задумана как ответ на вызовы, связанные с ограничениями каждого из подходов при их изолированном применении.

Главное достоинство новой модели – её трёхфазная структура:

1. Предварительное секвенирование с использованием модифицированной версии PepNet, которая генерирует наиболее вероятные аминокислотные последовательности на основе спектров.

2. Байесовская фильтрация и переформулирование гипотез, в ходе которой модель формирует множество возможных пептидов-кандидатов, расширяя пространство поиска по данным PepNet, но не ограничиваясь им.

3. Фаза согласования и ранжирования, в которой нейросетевой механизм сравнивает и калибрует совпадения между спектрами и теоретическими фрагментами как из предсказанных последовательностей, так и из базы данных, используя сигналы от обеих моделей как обучающие признаки.

Выводы

Результаты тестирования на реальных данных (включая датасет PXD004452) показали, что гибридная модель существенно повышает точность идентификации пептидов. Так, доля совпадений теоретических и экспериментальных фрагментов выросла в среднем на 17–22% по сравнению с использованием одного только de novo метода, а расстояние Левенштейна между предсказанными пептидами и референсными последова-

тельностями сократилось на 30% по сравнению с PepNet. Также точность (precision) составила 89%, а полнота (recall) – 92% на тестовой выборке, что превышает аналогичные показатели у Tide-search (85%/90%) и PepNet (71%/77%). Особенно выражен прирост точности был замечен на длинных и модифицированных пептидах, ранее создавших сложности для методов de novo.

Таким образом, предложенная модель показала свою состоятельность как инструмент высокой чувствительности и универсальности, особенно в задачах, связанных с неизвестными белками, редкими посттрансляционными модификациями или фрагментированными базами данных.

В перспективе предложенная архитектура может быть дополнительно усиlena с помощью самообучающихся стратегий (semi-supervised learning) на больших неразмеченных спектрах, расширения обучающих данных за счёт синтетических спектров, а также применения attention-механизмов, позволяющих учитывать контекст и физико-химические свойства аминокислот при принятии решений.

В перспективе исследований интеграция предложенной модели в существующие пайплайны масс-спектрометрического анализа предоставит возможности значительно повысить эффективность протеомных исследований, включая иммунопептидомику, метапротеомику и персонализированную медицину.

Список литературы

1. De novo: определение, применение, значение. URL: <https://www.cd-genomics.com/blog/de-novo-definition-applications-meaning/> (дата обращения: 15.06.2025).
2. Acquaye F. L., Kertesz-Farkas A., Noble W. S. Эффективное индексирование пептидов для поиска в базе данных с использованием Tide // Journal of Proteome Research. 2023. Vol. 22, N 2. P. 577–584.
3. Секвенирование белков de novo: приложения, проблемы и достижения. URL: <https://www.creative-proteomics.com/resource/protein-de-novo-sequencing-applications-challenges-advances.htm> (дата обращения: 11.06.2025).
4. Ng C. C. A., Zhou Y., Yao Z. P. Algorithms for de-novo sequencing of peptides by tandem mass spectrometry: A review // Analytica Chimica Acta. 2023. N 1268. P. 341330.
5. Секвенирование белков de novo: приложения, проблемы и достижения. URL: <https://www.creative-proteomics.com/resource/protein-de-novo-sequencing-applications-challenges-advances.htm> (дата обращения: 13.06.2025).
6. Accurate de novo peptide sequencing using fully convolutional neural networks / Kaiyuan Liu, Yuzhen Ye, Sujun Li, Haixu Tang // Nature Communications. 2023. N 14. P. 7974.
7. Основные термины фрагментации: В-ионы и Y-ионы в масс-спектрометрии пептидов. URL: <https://www.mtoz-biolabs.com/how-are-the-b-ions-and-y-ions-defined-in-mass-spectrometry.html> (дата обращения: 15.06.2025).
8. Расстояние Левенштейна. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Levenshtein_distance (дата обращения: 15.06.2025).
9. Integrating Database Search and de Novo Sequencing for Immunopeptidomics with DIA Approach / P. Shan, H. Tran [et al.]. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6936894/> (дата обращения: 15.06.2025).
10. Ebrahimi S., Guo X. Transformer-based de novo peptide sequencing for data-independent acquisition mass spectrometry (DiaTrans) // 2023 IEEE 23rd International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE). P. 17–22. URL: <https://arxiv.org/abs/2402.11363> (дата обращения: 22.06.2025).
11. Bioinformatics Methods for Mass Spectrometry-Based Proteomics Data Analysis / Chen Chen, Jie Hou, John J. Tanner, Jianlin Cheng // Int. J. Mol. Sci. 2020. N 21(8). P. 2873. <https://doi.org/10.3390/ijms21082873>
12. DePS: An improved deep learning model for de novo peptide sequencing / C. Ge [et al.]. URL: <https://arxiv.org/abs/2203.08820> (дата обращения: 22.06.2025).
13. PowerNovo: de novo peptide sequencing via tandem mass spectrometry using an ensemble of transformer and BERT models / D. V. Petrovskiy [et al.] // Sci. Rep. 2024. N 14. P. 15000.

14. Latent Imputation before Prediction: A New Computational Paradigm for De Novo Peptide Sequencing (LIPNovo) / Y. Du [et al.]. URL: <https://arxiv.org/html/2505.17524v1> (дата обращения: 22.06.2025).
15. π -PrimeNovo: an accurate and efficient non-autoregressive deep learning model for de novo peptide sequencing / X. Zhang [et al.] // Nat. Commun. 2025. N 16. P. 267.
16. Peptide-Spectra Matching from Weak Supervision / S. S. Schoenholz, S. Hackett, L. Deming [et al.]. URL: <https://arxiv.org/abs/1808.06576>. (дата обращения: 12.06.2025).
17. Complementary methods for de novo monoclonal antibody sequencing to achieve complete sequence coverage / J. Cheng [et al.] // J. Proteome. Res. 2020. N 19(7). P. 2700–2707.
18. De novo peptide sequencing by deep learning / N. H. Tran [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS). 2017. Vol. 114, N 31. P. 8247–8252. <https://doi.org/10.1073/pnas.1705691114>
19. DPST: De Novo Peptide Sequencing with Amino-Acid-Aware Transformers / Y. Yang [et al.]. URL: <https://arxiv.org/abs/2203.13132> (дата обращения: 22.06.2025).

Reference

1. De novo: definition, application, meaning. (In Russ.) Available at: <https://www.cd-genomics.com/blog/de-novo-definition-applications-meaning/> (accessed 15.06.2025).
2. Acquaye F.L., Kertesz-Farkas A., Noble W.S. Efficient indexing of peptides for database search using Tide. *Journal of Proteome Research*. 2023;22(2):577–584. (In Russ.)
3. De novo protein sequencing: applications, problems and achievements. (In Russ.) Available at: <https://www.creative-proteomics.com/resource/protein-de-novo-sequencing-applications-challenges-advances.htm> (accessed 11.06.2025).
4. Ng C.C.A., Zhou Y., Yao Z.P. Algorithms for de-novo sequencing of peptides by tandem mass spectrometry: A review. *Analytica Chimica Acta*. 2023;(1268):341330. (In Russ.)
5. De novo protein sequencing: applications, challenges, and achievements. (In Russ.) Available at: <https://www.creative-proteomics.com/resource/protein-de-novo-sequencing-applications-challenges-advances.htm> (accessed 13.06.2025).
6. Kaiyuan Liu, Yuzhen Ye, Sujun Li, Haixu Tang. Accurate de novo peptide sequencing using fully convolutional neural networks. *Nature Communications*. 2023;(14):7974. (In Russ.)
7. Basic fragmentation terms: B-ions and Y-ions in peptide mass spectrometry. (In Russ.) Available at: <https://www.mtoz-biolabs.com/how-are-the-b-ions-and-y-ions-defined-in-mass-spectrometry.html> (accessed 15.06.2025).
8. Levenshtein distance. (In Russ.) Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Levenshtein_distance (accessed 15.06.2025).

9. Shan P., Tran H., et al. Integrating Database Search and de Novo Sequencing for Immunopeptidomics with DIA Approach. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6936894/> (accessed 15.06.2025).
10. Ebrahimi S., Guo X. Transformer-based de novo peptide sequencing for data-independent acquisition mass spectrometry (DiaTrans). In: *2023 IEEE 23rd International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE)*. P. 17–22. Available at: <https://arxiv.org/abs/2402.11363> (accessed 22.06.2025).
11. Chen Chen, Jie Hou, John J. Tanner, Jianlin Cheng. Bioinformatics Methods for Mass Spectrometry-Based Proteomics Data Analysis. *Int. J. Mol. Sci.* 2020; (21):2873. <https://doi.org/10.3390/ijms21082873>
12. Ge C., et al. DePS: An improved deep learning model for de novo peptide sequencing. Available at: <https://arxiv.org/abs/2203.08820> (accessed 22.06.2025).
13. Petrovskiy D. V., et al. PowerNovo: de novo peptide sequencing via tandem mass spectrometry using an ensemble of transformer and BERT models. *Sci. Rep.* 2024; (14):15000.
14. Du Y., et al. Latent Imputation before Prediction: A New Computational Paradigm for De Novo Peptide Sequencing (LIPNovo). Available at: <https://arxiv.org/html/2505.17524v1> (accessed 22.06.2025).
15. Zhang X., et al. π -PrimeNovo: an accurate and efficient non-autoregressive deep learning model for de novo peptide sequencing. *Nat. Commun.* 2025; (16):267.
16. Schoenholz S.S., Hackett S., Deming L., et al. Peptide-Spectra Matching from Weak Supervision. Available at: <https://arxiv.org/abs/1808.06576>. (accessed 12.06.2025).
17. Cheng J., et al. Complementary methods for de novo monoclonal antibody sequencing to achieve complete sequence coverage. *J. Proteome. Res.* 2020; 19(7):2700–2707.
18. Tran N.H., et al. De novo peptide sequencing by deep learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*. 2017; 114(31):8247–8252. <https://doi.org/10.1073/pnas.1705691114>
19. Yang Y., et al. DPST: De Novo Peptide Sequencing with Amino-Acid-Aware Transformers. Available at: <https://arxiv.org/abs/2203.13132> (accessed 22.06.2025).

Информация об авторе / Information about the Author

Тевяшов Михаил Михайлович,
младший научный сотрудник,
Санкт-Петербургский государственный
экономический университет,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: tukaramm@yandex.ru,
ORCID: 0009-0005-5597-5037

Mikhail M. Teviashov, Research Assistant,
Saint Petersburg State University of Economics,
St. Petersburg, Russian Federation,
e-mail: tukaramm@yandex.ru
ORCID: 0009-0005-5597-5037

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-142-159>



УДК 621.373.1

Анализ возможностей двухпроводного способа подключения резистивного датчика температуры

О. Г. Бондарь¹✉, Е. О. Брежнева¹, С. С. Демченко¹

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

✉ e-mail: b.og@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Широкое применение в промышленности средств измерения температуры с резистивными датчиками, подключаемыми по трёхпроводной или четырёхпроводной схемам, в системах управления технологическими процессами приводит к усложнению кабельных сетей, коммутаторов и существенно ограничивает количество измерительных каналов единичного модуля аналогового ввода. Двухпроводная схема подключения, минимизирующая эти недостатки, вносит в результаты измерения значительные погрешности за счёт дополнительного нестабильного вносимого сопротивления проводников соединительной линии. Исследуется предложенный авторами способ уменьшения вносимой соединительной линией погрешности, основанный на оценке сопротивления по результатам интегрирования переходного процесса разряда шунтирующего датчик конденсатора. Оценивается степень влияния эффекта квантования, шумов и интервалов интегрирования реакции измерительной цепи на погрешность определения сопротивления.

Методы. Оценка влияния факторов проведена моделированием в среде MATLAB и экспериментальной апробацией предложенного решения на макетном образце.

Результаты. Показано существенное преимущество интегрирования методом трапеций, позволяющим получить в условиях эксперимента погрешности более чем в 300 раз меньшие, чем методом левых прямоугольников. Определено оптимальное время интегрирования, уменьшающее влияние шумов квантования и помех на погрешность измерения в диапазоне изменения сопротивления датчика. Выявлено, что оптимальные значения времени интегрирования изменяются пропорционально величине сопротивления резистивного датчика, а отклонение от оптимального значения до 50% некритично увеличивает погрешность оценки его сопротивления.

Заключение. Погрешность измерения сопротивления резистивного датчика предложенным способом в одинаковых условиях сопоставима с погрешностями способа, базирующегося на интегрировании всего переходного процесса разряда конденсатора. Максимальная погрешность в условиях эксперимента не превышает 0,12% при измерении сопротивления, равного 2 кОм, а при остальных значениях – существенно меньше. При этом применение предложенного решения позволяет существенно повысить быстродействие за счёт уменьшения времени интегрирования и уменьшить объём оборудования за счёт исключения сложного коммутатора в сканирующих системах.

Ключевые слова: резистивный датчик; температура; микроконтроллер; математическая модель; погрешности измерения; двухпроводная схема; интервал интегрирования; метод трапеций; вычислительные алгоритмы.

© Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Демченко С. С., 2025

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025;15(3):142–159

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Для цитирования: Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Демченко С. С. Анализ возможностей двухпроводного способа подключения резистивного датчика температуры // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 3. С. 142–159. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-142-159>

Поступила в редакцию 05.07.2025

Подписана в печать 03.08.2025

Опубликована 30.09.2025

Analysis of the possibilities of a two-wire connection method for a resistive temperature sensor

Oleg G. Bondar¹✉, Ekaterina O. Brezhneva, Sergey S. Demchenko

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

✉ e-mail: b.og@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The widespread use of temperature measurement devices with resistive sensors connected via three-wire or four-wire configurations in industrial process control systems leads to increased complexity of cabling networks and switching components, and significantly limits the number of measurement channels per analog input module. A two-wire connection scheme, which minimizes these drawbacks, introduces significant measurement errors due to additional and unstable resistance from the connecting wires. This work investigates a method proposed by the authors for reducing the error introduced by the connecting line, based on estimating resistance from the integration of the capacitor discharge transient process across the sensor. The study evaluates the impact of quantization effects, noise, and integration intervals of the measurement circuit's response on the accuracy of resistance determination.

Methods. The assessment of the factors was carried out through simulation in MATLAB and experimental validation of the proposed solution on a prototype model.

Results. A significant advantage of trapezoidal integration has been demonstrated, allowing for measurement errors more than 300 times smaller under experimental conditions compared to the left rectangle method. The optimal integration time was determined, which minimizes the influence of quantization noise and interference on measurement error across the sensor's resistance range. It was found that the optimal integration time is proportional to the resistance value of the sensor, and deviations from the optimal value by up to 50% result in only a minor increase in estimation error.

Conclusion. The measurement error of the resistive sensor's resistance using the proposed method under identical conditions is comparable to that of the method based on integrating the entire capacitor discharge transient process. The maximum error under experimental conditions does not exceed 0.12% when measuring a resistance of 2 kΩ, and is significantly lower for other values. At the same time, the proposed solution allows for a substantial increase in speed due to reduced integration time, and a reduction in equipment size by eliminating the need for a complex switch matrix in scanning systems.

Keywords: resistive sensor; temperature; microcontroller; mathematical model; measurement errors; two-wire configuration; integration interval; trapezoidal method; computational algorithms.

Conflict of interest: The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

For citation: Bondar O.G., Brezhneva E.O., Demchenko S.S. Analysis of the possibilities of a two-wire connection method for a resistive temperature sensor. *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(3):153-168. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-142-159>

Received 05.07.2025

Accepted 03.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

Направленное на повышение точности измерения совершенствование методов измерения температуры при применении их в различных областях науки, техники и производстве является актуальной научно-технической задачей, решению которой посвящено значительное количество научных работ. Исследование температурных полей вихревых потоков важно для систем термостатирования и аэрокосмической техники [1], а изучение тепловых свойств материалов необходимо, например, для проектирования энергоэффективных зданий [2]. Изучение распределения температуры вдоль волокна при работе волоконных лазеров позволяет решать вопросы их надежного функционирования уже на этапе проектировании [3]. Термометрия со сверхвысоким разрешением востребована в болометрах при зондировании биологических объектов, электронных и оптоэлектронных устройств [4]. Основная область применения средств измерения температуры – промышленное производство.

В качестве датчиков температуры широко используются резистивные датчики (РД), отвечающие требованиям надежности и точности измерений в широком диапазоне изменения температур.

РД используются и для измерения других величин, например давления или влажности [5].

В последние годы разрабатываются новые решения, направленные на совершенствование средств измерения температуры с использованием РД.

При умеренных требованиях к погрешности измерений используются так называемые прямые цифровые интерфейсы. В [6] предложена универсальная мостовая схема, позволяющая на основе промежуточного преобразования во временной интервал определить неизвестное сопротивление или ёмкость.

Преобразование сопротивления во временной интервал с подавлением влияния сопротивления соединительной линии может быть реализовано при трёхпроводном подключении РД [7].

Усложнение измерительной схемы за счёт введения операционных усилителей, компараторов и аналоговых ключей позволяет повысить точность измерения. Способ измерения температуры в заданном диапазоне температур нулевым методом основан на компенсации вольт-секундной площади импульса постоянной длительности с амплитудой, пропорциональной сопротивлению РД, разностью площадей широтно-модулированных импульсов с амплитудами,

соответствующими максимальной и минимальной границам температурного диапазона [8].

Линеаризованная неуравновешенная мостовая схема измерения с подавлением влияния сопротивления соединительной линии при трёхпроводном подключении РД описана в [9].

Удаленное размещение РД, характерное для распределенных измерительных систем, приводит к погрешностям измерения температуры, вызванным влиянием сопротивления соединительных проводов на результаты измерений. Широко используемым техническим решением, направленным на снижение погрешностей измерения температуры за счет компенсации или исключения сопротивления проводников, является применение трех- и четырехпроводных схем подключения РД, удорожающих систему как за счёт увеличения стоимости присоединительных линий, так и коммутаторов в многоканальных системах.

Реализовать простоту двухпроводных подключений позволяет применение различных вариантов модернизации измерительных схем, требующих усложнения алгоритмов измерения и обработки измерительной информации, базирующихся на применении микроконтроллеров (МК). Модернизация измерительных схем сопряжена с введением дополнительных элементов (стабилитронов, диодов, источников тока, коммутаторов и т. п.).

В [10] это достигается при использовании пары согласованных по характеристикам диодов, один из которых включается последовательно с РД, а другой шунтирует эту цепь при смене полярности питающего её напряжения. При одной полярности тока падение напряжения определяется падением напряжения на диоде, сопротивлением проводов и РД, а при другой – падением напряжения на диоде и сопротивлением проводов. Вычитание этих величин позволяет определить падение напряжения на РД. Реально падения напряжения даже на согласованной паре диодов отличаются.

В [11] для учёта действительных падений напряжений на согласованных диодах питание цепи осуществляется трёхступенчатым током положительной и отрицательной полярности, а по измеренным напряжениям вычисляется сопротивление РД. Измерительная схема характерна сложностью источника питания.

Сопротивление линии может быть определено при питании известным током измерительной цепи в виде РД, шунтированного прецизионным стабилитроном [12]. Суммарное сопротивление РД и линии определяются при питании измерительной цепи от источника, гарантирующего напряжение на её зажимах, меньшее напряжения пробоя стабилитрона. Малое значение падения напряжения на сопротивлении линии в сравнении с напряжением пробоя

прецзионного стабилитрона существенно снижает точность его определения.

В [13] предложен способ измерения РД, базирующийся на использовании прямого цифрового интерфейса с промежуточным преобразованием во временной интервал и подавлением влияния сопротивления линии. Для обеспечения приемлемой точности при ограничении времени измерения предложено использовать ПЛИС.

Авторами предложены решения, исключающие влияние сопротивления соединительной линии при двухпроводном подключении датчика за счет введения одного дополнительного элемента схемы – конденсатора, шунтирующего РД, и импульсного питания измерительной цепи. При этом сопротивление РД определяется через напряжение на нём, ток, протекающий в измерительной цепи, – при полностью заряженном конденсаторе. Напряжение на РД при заряженном конденсаторе в соответствии с законом коммутации равно напряжению на нём после отключения питания измерительной цепи. Для определения напряжения может использоваться его непосредственное измерение [14], но более точные результаты достигаются при обработке результатов измерения напряжения во время переходного процесса разряда конденсатора на РД [15]. Результаты экспериментальных исследований способа измерения представлены в [16]. Поскольку интегрирование осуществляется на всём интервале

переходного процесса, то это приводит к увеличению времени измерения и увеличению влияния апериодических помех, возникающих на заключительном участке интервала интегрирования.

Материалы и методы

Предложен способ измерения температуры, позволяющий снизить погрешности измерения при двухпроводном подключении датчика при сокращении времени измерения, заключающийся в вычислении падения напряжения на РД по результатам интегрирования переходного процесса разряда конденсатора на некотором временном интервале с сохранением результатов в середине t_1 и конце интервала $t_2 = 2t_1$ соответственно. На рисунке 1 представлена структура измерительного устройства, реализующая предложенный способ измерения.

Цель РД питается прямоугольными импульсами заданной скважности. За время импульса конденсатор полностью заряжается. В установившемся режиме по окончании процесса заряда конденсатора измеряется напряжение на опорном резисторе. По завершении импульса диод смещается в обратном направлении и разрывает цепь питания РД. С заданным шагом дискретизации напряжение на РД, поддерживаемое разряжающимся конденсатором, преобразуется в цифровой код и осуществляется численное интегрирование. Значения интегралов S_1 и S_2 сохраняются в середине и конце интервала интегрирования в

моменты времени t_1 и t_2 соответственно. Ограничение длительности интервала интегрирования $t_2 = 2t_1$ позволяет повысить быстродействие и уменьшить

погрешность интегрирования, связанную с эффектом уменьшения напряжения на РД в конце переходного процесса до величин сопоставимых с шагом квантования.

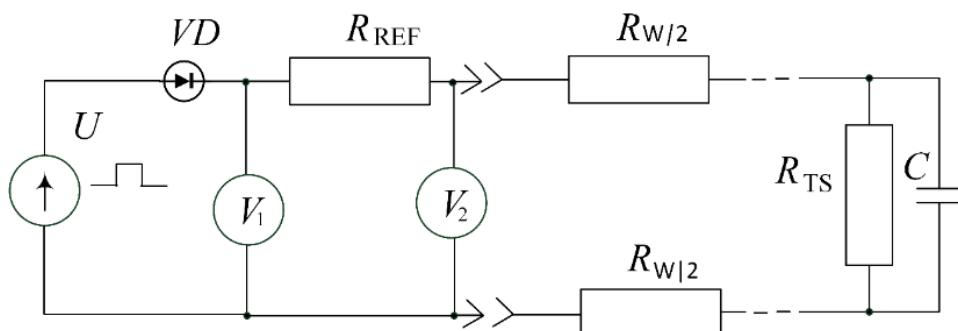


Рис. 1. Схема измерения сопротивления РД при двухпроводном подключении интегрирующим методом: U – источник импульсного напряжения питания измерительной цепи; V_1 , V_2 – вольтметры; VD – диод; R_{REF} – опорный резистор, $R_{W/2}$ – сопротивление соединительных проводов; R_{TS} – резистивный датчик (Termosensor); C – шунтирующий конденсатор

Fig. 1. Measurement scheme of the resistance of R_{TS} using an integrating method with a two-wire connection: U – power supply voltage source for the measurement circuit; V_1 , V_2 – voltmeters; VD – diode; R_{REF} – reference resistor; $R_{W/2}$ – resistance of the connecting wires; R_{TS} – resistive sensor (Thermosensor); C – shunting capacitor

Напряжение на РД в конце заряда конденсатора (U_{TS0}) определяется в соответствии со следующим выражением:

$$U_{TS0} = U_{POW} \cdot R_{TS} / (R_{REF} + R_w + R_{TS}), \quad (1)$$

где U_{POW} – напряжение питания, измеренное вольтметром V_1 ; R_{REF} – сопротивление опорного резистора; R_w – сопротивление соединительных проводников; R_{TS} – сопротивление РД.

Напряжение на опорном резисторе U_{REF} , которое может быть определено как разность показаний вольтметров V_1 и V_2 , рассчитывается как

$$U_{REF} = U_{POW} \cdot R_{REF} / (R_{REF} + R_w + R_{TS}). \quad (2)$$

При завершении импульса напряжение на конденсаторе РД уменьшается по экспоненциальному закону:

$$\begin{aligned} U_{TS} &= U_{TS0} \cdot \exp(-t / \tau) = \\ &= U_{TS0} \cdot \exp(-n \cdot \Delta t / \tau), \end{aligned} \quad (3)$$

где $t = n \cdot \Delta t$ – время от начала переходного процесса разряда конденсатора; Δt – интервал дискретизации; n – количество интервалов дискретизации, укладывающихся во временной интервал t ; $\tau = R_{TS}C$ – постоянная времени цепи разряда конденсатора.

Интеграл напряжения переходного процесса разряда конденсатора на резистивный датчик температуры на интервале времени t_1 :

$$S_1 = \tau U_{TS0} [1 - \exp(-t_1 / \tau)]. \quad (4)$$

Интеграл напряжения переходного процесса разряда конденсатора на резистивный датчик температуры на интервале времени t_2 :

$$S_2 = \tau U_{TS0} [1 - \exp(-t_2/\tau)]. \quad (5)$$

Отношение интегралов (S_2/S_1) может быть определено в соответствии со следующим выражением:

$$\begin{aligned} S_2 / S_1 &= \frac{(\exp(t_1/\tau) + 1)(\exp(t_1/\tau) - 1)}{(\exp(t_1/\tau) - 1)} \times \\ &\times \frac{1}{\exp(t_1/\tau)} = 1 + \exp(-t_1/\tau). \end{aligned} \quad (6)$$

Определяя отсюда постоянную времени и подставляя её в (4), получим

$$U_{TS} = -S_1 \frac{\ln(S_2 / S_1 - 1)}{t_1(2 - S_2 / S_1)}. \quad (7)$$

Так как напряжения на опорном резисторе и РД в конце процесса заряда конденсатора в соответствии с (1) и (2) пропорциональны их сопротивлениям, то

$$R_{TS} = R_{REF} U_{TS} / U_{REF}. \quad (8)$$

Поскольку применяемые в промышленности решения обычно опираются на использование модулей аналогового ввода, подключаемых к программируемым логическим контроллерам, то неотъемлемыми элементами подобных систем являются аналого-цифровые преобразователи (АЦП), мультиплексоры, микроконтроллеры, источники опорного напряжения или тока, опорные резисторы. Предлагаемый способ подразумевает применение перечисленных устройств, однако при этом исключается необходимость в сложных мультиплексорах, поскольку для реализации многочанальности требуются лишь два аналоговых входа АЦП и двунаправленные цифровые выводы по числу

коммутируемых измерительных каналов, а также снижаются требования к точности опорных источников [16].

Исследование способа измерения

Для оценки потенциальных возможностей способа использовалась математическая модель устройства, реализованная в MATLAB. С её помощью оценивалось влияние на погрешность определения РД интервала дискретизации, способа интегрирования, интервала интегрирования, эффектов квантования и шумов. Исследования проводились для диапазона изменения сопротивления РД равного 4, что в случае применения платиновых термометров сопротивления позволяет перекрыть диапазон температур в 800°C. Питание цепи РД может осуществляться как от источника тока, так и от источника напряжения через опорный резистор (в модели и стенде использовался последний вариант).

Напряжение на РД вычисляется в дискретные моменты времени по выражению (3), а интегрирование осуществляется численным методом. Важным параметром, влияющим на погрешность измерения, является отношение интервала дискретизации к постоянному времени разряда конденсатора. На рисунке 2 приведена зависимость относительной погрешности определения РД от величины интервала интегрирования для различных отношений интервала дискретизации к постоянному времени при методе интегрирования левых прямоугольников.

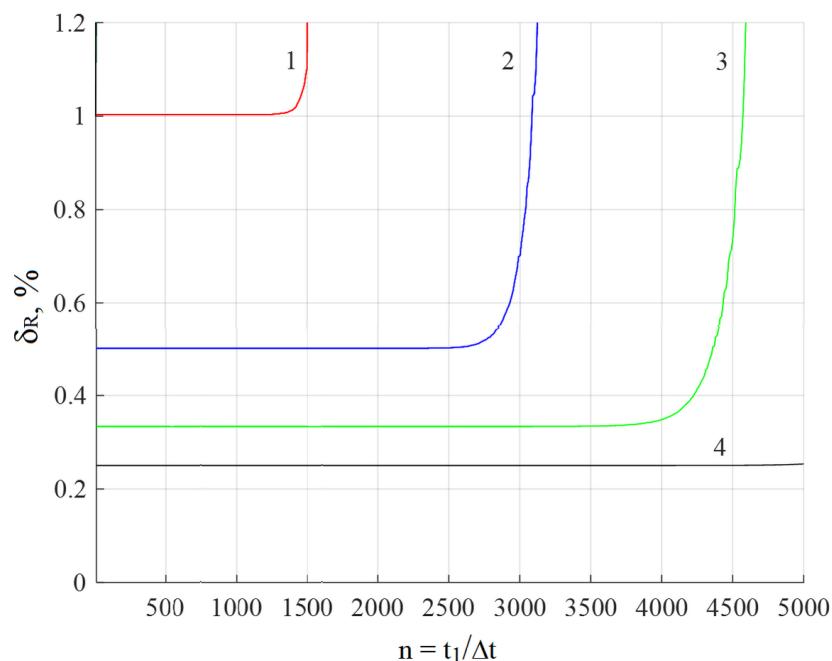


Рис. 2. Зависимость погрешности определения сопротивления РД от времени интегрирования методом левых прямоугольников при различных отношениях $\Delta t/\tau$: 1 – 1/50; 2 – 1/100; 3 – 1/150; 4 – 1/200

Fig. 2. Dependence of the error in determining the resistance of the RTS on the integration time using the left rectangle method at various $\Delta t/\tau$ ratios: 1 – 1/50; 2 – 1/100; 3 – 1/150; 4 – 1/200

Графики на рисунке 2 демонстрируют пропорциональную зависимость погрешности от отношения $\Delta t/\tau$. При этом

$$\delta_R = 50 \frac{\Delta t}{R_{TS}}, \% . \quad (9)$$

Погрешность определения сопротивления резко возрастает при приближении интервала интегрирования к концу переходного процесса разряда конденсатора и отношения S2/S1 к 1, что сопровождается с стремлением абсолютной величины числителя выражения (7) к $-\infty$.

На рисунке 3 приведены аналогичные зависимости для интегрирования методом трапеций.

При этом погрешность определения сопротивления РД (%) подчиняется квадратичной зависимости:

$$\delta_R = 8,3(3) \left(\frac{\Delta t}{R_{TS}} \right)^2 . \quad (10)$$

При постоянной времени превышающей интервал дискретизации в 100 раз относительная погрешность становится меньше $10^{-3}\%$, а для метода левых прямоугольников – 0,5%. Такое существенное отличие в величине погрешности при практически одинаковой вычислительной сложности приводит к целесообразности интегрирования методом трапеций.

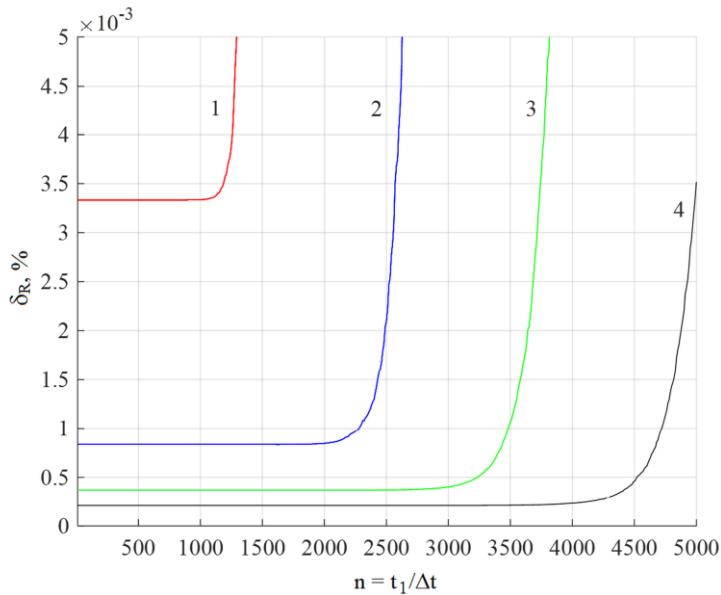


Рис. 3. Зависимость погрешности определения сопротивления РД от времени интегрирования методом трапеций при различных отношениях $\Delta t/\tau$:
1 – 1/50; 2 – 1/100; 3 – 1/150; 4 – 1/200

Fig. 3. Dependence of the error in determining the resistance of RTS
on the integration time using the trapezoidal method at various $\Delta t/\tau$ ratios:
1 – 1/50; 2 – 1/100; 3 – 1/150; 4 – 1/200

При реализации стенда номинальное значение сопротивления РД принято равным 1 кОм, а ёмкость шунтирующего конденсатора – 6,8 мкФ. При этом увеличение частоты дискретизации от рекомендованных производителем МК 10 кГц до 40 кГц не привело к увеличению погрешности однократного измерения напряжения на начальном участке переходного процесса. Это позволило выбрать интервал дискретизации равным 26 мкс. Дальнейшее моделирование осуществлялось при выбранных параметрах измерительной цепи и использовании микроконтроллера ATmega328 с встроенным 10-битовым АЦП. При этом необходимости в применении диода для разрыва цепи питания датчика нет, т. к. разрыв цепи осуществляется переводом вывода порта МК в режим ввода.

Результат оценки погрешности определения сопротивления РД,

обусловленной интегрированием переходного процесса методом трапеций для значений сопротивлений в диапазоне 1–4 кОм, представлен ниже (рис. 4).

Согласно полученным результатам, погрешностями алгоритма вычислений в выбранных условиях можно пренебречь (менее 0,00013%).

Для оценки влияния квантования измеряемого напряжения использовалась операция округления измеряемых напряжений до целых. При этом напряжение питания измерительной цепи, измеряемое в соответствии с рисунком 1 вольтметром V_1 , принималось равным максимальному коду АЦП (для n -разрядного АЦП – 2^n). Для десятиразрядного АЦП зависимости относительной погрешности определения РД от интервала интегрирования приведены на рисунке 5.

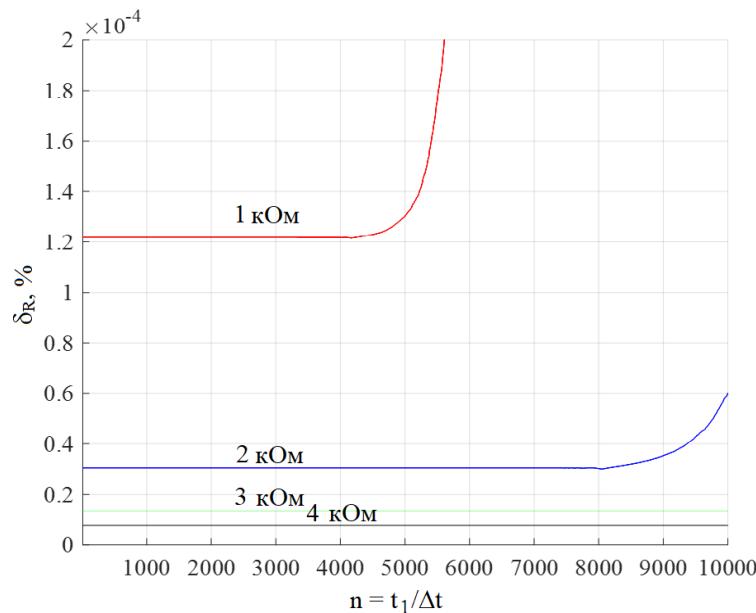


Рис. 4. Зависимость погрешности измерения от времени интегрирования методом трапеций

Fig. 4. Dependence of the measurement error on the integration time using the trapezoidal method

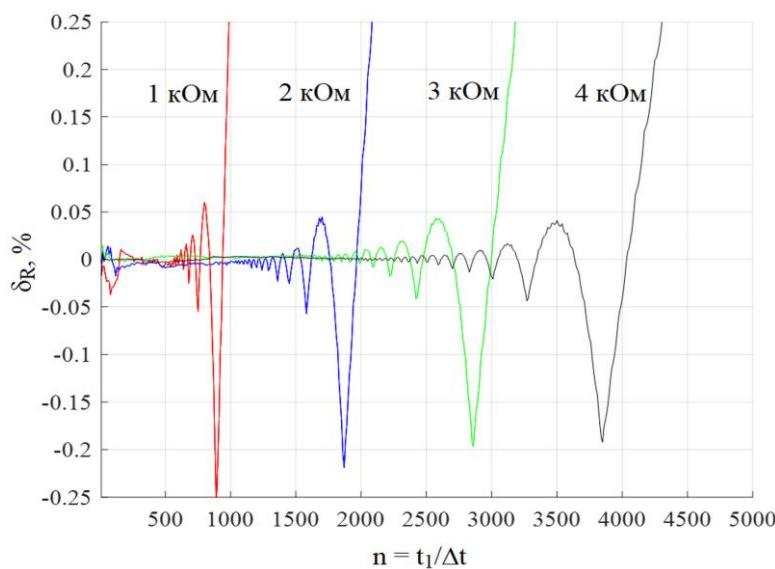


Рис. 5. Зависимость погрешности от времени интегрирования с учетом эффекта квантования 10-разрядным АЦП при известном токе питания цепи РД

Fig. 5. Dependence of the error on the integration time considering the quantization effect of a 10-bit ADC at a known circuit supply current

Анализ поведения этих зависимостей позволяет сделать вывод о существовании диапазонов интервалов интегрирования, в пределах которых погрешность минимальна. Влияние некоррелированных с сигналом шумов (они

могут специально подмешиваться), распределённых по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением (СКО), равным единице младшего разряда, рассмотрим ниже (рис. 6).

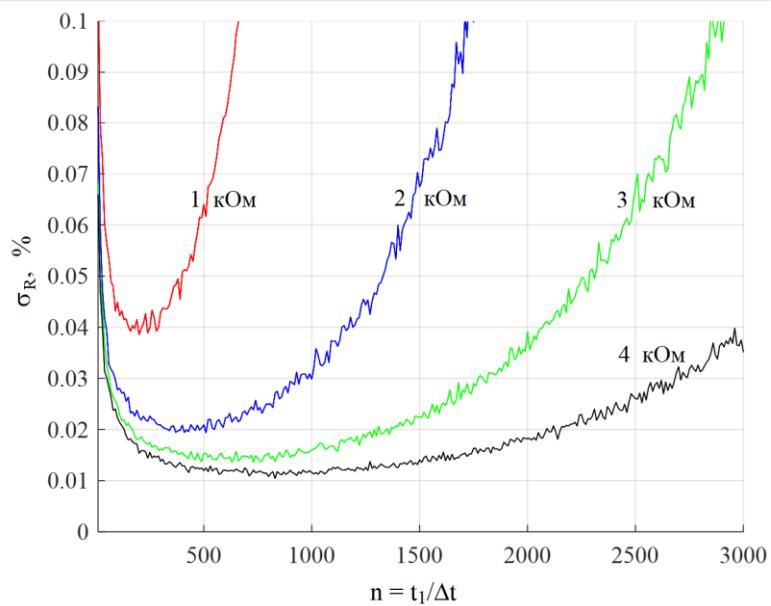


Рис. 6. Зависимость СКО вычисленных значений от номинальных значений сопротивлений РД от времени интегрирования с учетом эффекта квантования и влияния шумов при усреднении по 500 измерениям

Fig. 6. Dependence of the RMS deviation of computed resistance values from nominal RD values on integration time, considering quantization effects and noise influence when averaged over 500 measurements

Положение минимума СКО зависит от величины измеряемого сопротивления, т. е. для каждого значения сопротивления РД существует оптимальное время интегрирования. Величина оптимального времени интегрирования оказывается пропорциональной величине сопротивления РД, а отклонение от оптимального значения в пределах 50% несущественно влияет на σ . При этом $t_1 \approx 0,76\tau$.

Оптимальное время интегрирования t_1 можно оценить в соответствии с выражением:

$$t_1 = t_{IN} \cdot R_{TS} / R_{TSN}, \quad (11)$$

где t_{IN} – оптимальное время интегрирования при номинальном значении сопротивления РД; R_{TSN} – номинальное значение сопротивления РД.

Однако для его определения необходимо знать величину сопротивления R_{TS} . Большое допустимое отклонение времени интегрирования от оптимального значения позволяет для его оценки воспользоваться однократным измерением напряжения на зажимах соединительной линии в конце импульса заряда конденсатора, или после отключения питания, с минимальной задержкой (5–10 мкс) после завершения колебательного переходного процесса, возникающего в длинной линии после отключения питания цепи РД.

Следует учитывать, что представленные результаты моделирования не учитывают погрешности, которые вызываются дифференциальной и интегральной нелинейностью АЦП.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 7 представлен исследовательский стенд на платформе ARDUINO с МК ATmega328, ресурсов и производительности которого достаточно для управления и обработки результатов измерения. В качестве измеряемого сопротивления используется магазин сопротивлений *P4831* с классом точности 0,02.

Для оценки способности к подавлению сопротивления линии её сопротивление искусственно завышено включением последовательно с проводниками резисторов по 120 Ом.

Программное обеспечение МК, разработанное авторами, позволяет задавать количество измерений, рассчитывает средние, максимальные и минимальные значения сопротивлений, обозначенных как *RTD_average*, *RTD_max* и *RTD_min*, соответственно. В ходе эксперимента сопротивление последовательно

устанавливалось равным 1, 2, 3 и 4 кОм, а для каждого его значения осуществлялось 100 измерений. Оптимальное время интегрирования t_{IN} уточнялось на основе экспериментальных данных и было принято равным $100 \cdot \Delta t$. Время интегрирования определяется в соответствии с (11) на основе однократного измерения после завершения заряда конденсатора и отключения питания цепи РД. Поскольку измеряемое напряжение запоминается встроенным устройством выборки-хранения, а затем осуществляется его преобразование АЦП в цифровой код, то это позволяет дозарядить конденсатор во время преобразования. Функция преобразования корректировалась в соответствии с линейной регрессионной моделью. На рисунке 8 представлен скриншот терминальной программы с результатами измерений сопротивления РД предложенным способом.

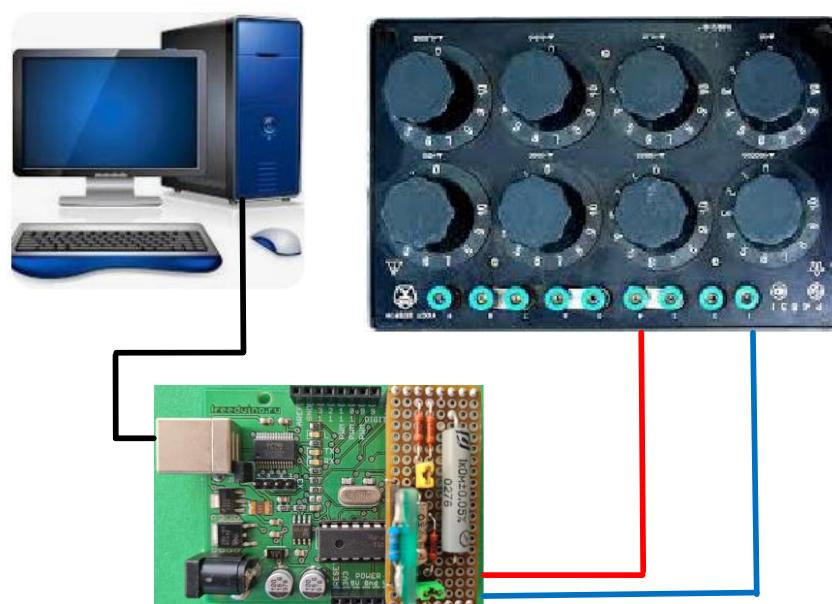


Рис. 7. Исследовательский стенд

Fig. 7. Research stand

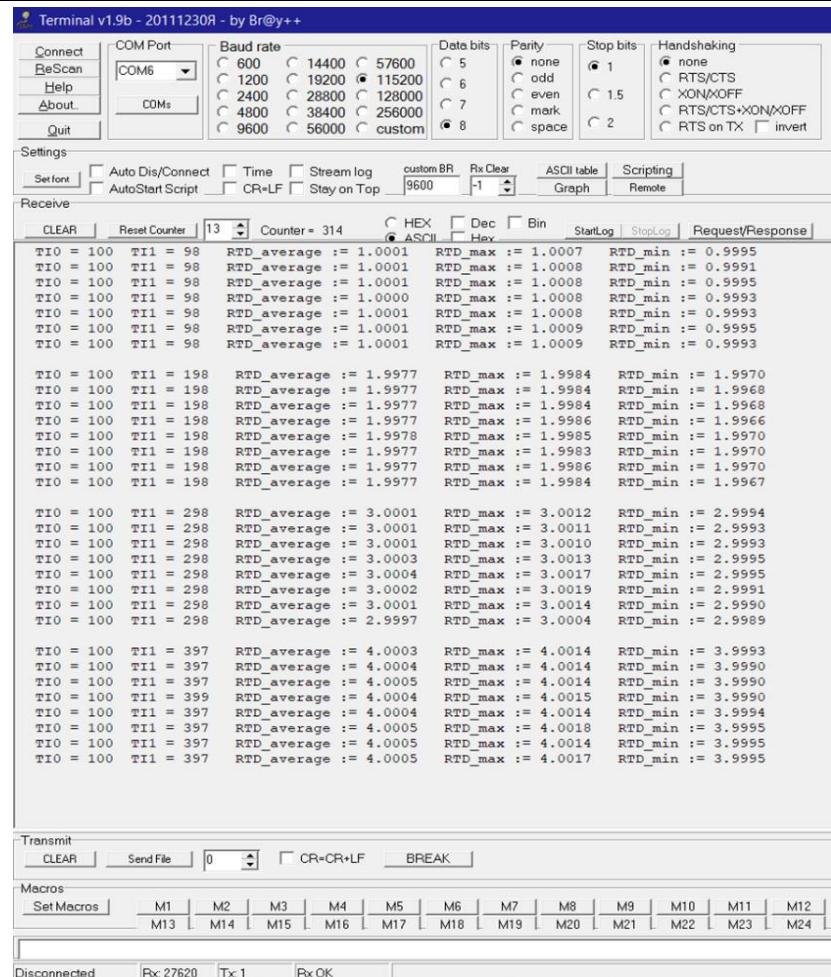


Рис. 8. Скриншот терминала с результатами измерений РД: TIO – оптимальное время интегрирования, соответствующее номинальному сопротивлению РД – 1 кОм; TI1 – оптимальное время интегрирования при измерении конкретного значения сопротивления

Fig. 8. Screenshot of the terminal with RTS measurement results: TIO – optimal integration time corresponding to the nominal resistance of the RTS – 1 kΩ; TI1 – optimal integration time for measuring a specific resistance value

В таблице 1 сопоставлены относительные погрешности измерения сопротивлений РД двумя способами: на основе обработки результатов интегрирования

на всём интервале переходного процесса разряда конденсатора на РД (B.1) и способом, рассмотренным в данной работе (B.2).

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований

Table 1. Results of experimental studies

$R_{\text{ном}}$, кОм	$R_{\text{ср}}$	R_{max}	R_{min}	$\delta, \%$	
				B.1	B.2
1	1,0001	1,0009	0,9991	0,11	0,01
2	1,9977	1,9977	1,9966	-0,0558	-0,115
3	3,0001	3,0019	2,9989	0,0768	0,003
4	4,0004	4,0018	3,9990	0,0201	0,01

Выводы

Проведено исследования метода измерения сопротивления резистивного датчика при его двух проводном подключении методом моделирования в среде MATLAB. Получены выражения, позволяющие оценить составляющую погрешности определения сопротивления датчика, вызванную применяемым методом численного интегрирования от соотношения интервала дискретизации и постоянной времени разряда конденсатора на резистивный датчик. Показано существенное преимущество интегрирования методом трапеций, позволяющим получить в условиях эксперимента погрешности, более чем в 300 раз меньшие, чем методом левых прямоугольников.

Исследовано влияние эффекта квантования и шумов на результаты измерений. Построены зависимости распределения погрешностей измерения от времени интегрирования, выраженного количеством интервалов дискретизации, позволяющие определить оптимальные временные интервалы t_1 для различных номинальных значений сопротивлений термистора. Выявлено наличие диапазонов времён интегрирования, в которых относительная

погрешность определения сопротивления РД достигает минимальных значений. При этом выявлено, что оптимальные значения времени интегрирования изменяются пропорционально величине сопротивления РД, а отклонение от оптимального значения до 50% несущественно увеличивает погрешность оценки сопротивления РД. Этот позволяет проводить оценку оптимального времени интегрирования по результатам однократного измерения напряжения заряженного конденсатора.

Проведена апробация метода на экспериментальном стенде. Достигнутые значения погрешностей измерения сопротивлений предложенным способом сопоставимы с погрешностями способа, базирующегося на интегрировании всего переходного процесса разряда конденсатора. Максимальная погрешность в условиях эксперимента не превышает 0,12% при измерении сопротивления, равного 2 кОм, а при остальных значениях – существенно меньше. При этом применение предложенного решения позволяет существенно повысить быстродействие за счет уменьшения времени интегрирования и уменьшить объём оборудования за счёт исключения сложного коммутатора в сканирующих системах.

Список литературы

1. Development of Method of Low-Perturbation Multichannel Temperature Diagnostics in Vortex Tube / I. K. Kabardin, M. K. Pravdina, M. R. Gordienko [et al.] // J. Engin. Thermophys. 2022. N 31. P. 309–314. <https://doi.org/10.1134/S1810232822020114>

2. Malinarič S. The Application of the Finite Elements Method in the Transient Measurements of Thermophysical Parameters // Int. J. Thermophys. 2024. N 45. P. 22. <https://doi.org/10.1007/s10765-023-03311-1>
3. Распределенное измерение температуры в непрерывных гольмиеевых волоконных лазерах / В. А. Камынин, А. А. Вольф, М. И. Скворцов, С. А. Филатова, М. С. Копьева, В. Б. Цветков, С. А. Бабин // Фотон-экспресс. 2021. № 6. С. 347–348. <https://doi.org/10.24412/2308-6920-2021-6-347-348>
4. Reihani A., Meyhofer E., Reddy P. Nanokelvin-resolution thermometry with a photonic microscale sensor at room temperature // Nat. Photon. 2022. Vol. 16. P. 422–427. <https://doi.org/10.1038/s41566-022-01011-0>
5. Скорик И. В., Иванченко Ю. А. Разработка резистивного датчика влажности почвы // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2021. № 4. С. 181.
6. José Antonio Hidalgo-López. A simple digital readout circuit for differential resistive or capacitive sensors // Meas. Sci. Technol. 2023. Vol. 34, N 8. P. 085117. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/acd139>
7. Reverter F. A Microcontroller-Based Interface Circuit for Three-Wire Connected Resistive Sensors // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2022. N 71. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3219492>
8. Филатов А. В., Сердюков К. А., Новикова А. А. Перспективы использования модифицированного нулевого метода измерений температуры датчиками сопротивления // Измерительная техника. 2020. № 7. С. 51–55. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-7-51-55>
9. Piechowski L., Muc A., Iwaszkiewicz J. The Precise Temperature Measurement System with Compensation of Measuring Cable Influence // Energies. 2021. N 14(24). P. 8214. <https://doi.org/10.3390/en14248214>
10. Nagarajan P. R., George B., Kumar V. J. Improved Single-Element Resistive Sensor-to-Microcontroller Interface // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2017. N 66. P. 2736–2743. <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2712918>
11. A Procedure for Precise Determination and Compensation of Lead-Wire Resistance of a Two-Wire Resistance Temperature Detector / A. Rerkratn, S. Prombut, T. Kamsri, V. Riewruja, W. Petchmaneelumka // Sensors. 2022. N 22(11). P. 4176. <https://doi.org/10.3390/s22114176>
12. Li W., Xiong S., Zhou X. Lead-Wire-Resistance Compensation Technique Using a Single Zener Diode for Two-Wire Resistance Temperature Detectors (RTDs) // Sensors. 2020. N 20(9). P. 2742. <https://doi.org/10.3390/s2009274>
13. José A. Hidalgo-Lopez. Direct interface circuits for resistive sensors affected by lead wire resistances // Measurement. 2023. N 218. P. 113250. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113250>

14. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Родионов П. С. Многоканальный преобразователь температуры // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2022. № 65(4). С. 254–261. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2022-65-4-254-261>
15. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Ботиков К. А. Исследование метода измерения температуры при двухпроводном подключении термометра сопротивления // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. № 28(1). С. 71–87. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-71-87>
16. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Ботиков К. А. Автоматическая подстройка параметров алгоритма измерения температуры в широком диапазоне // Измерительная техника. 2024. № 4. С. 46–53. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-4-46-53>

References

1. Kabardin I.K., Pravdina M.K., Gordienko M.R., et al. Development of Method of Low-Perturbation Multichannel Temperature Diagnostics in Vortex Tube. *J. Engin. Thermophys.* 2022;(31):309–314. <https://doi.org/10.1134/S1810232822020114>
2. Malinarič S. The Application of the Finite Elements Method in the Transient Measurements of Thermophysical Parameters. *Int. J. Thermophys.* 2024;(45):22. <https://doi.org/10.1007/s10765-023-03311-1>
3. Kamynin V.A., Wolf A.A., Skvortsov M.I., Filatova S.A., Kopyeva M.S., Tsvetkov V.B., Babin S.A. Raspredelennoe izmerenie temperatury v nepreryvnyh gol'mievyh volokonnyh lazerah. *Foton-ekspres* = *Foton-Jekspress*. 2021;(6):347–348. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2308-6920-2021-6-347-348>
4. Reihani A., Meyhofer E., Reddy P. Nanokelvin-resolution thermometry with a photonic microscale sensor at room temperature. *Nat. Photon.* 2022;16:422–427. <https://doi.org/10.1038/s41566-022-01011-0>
5. Skorik I.V., Ivanchenko Y.A. Razrabotka rezistivnogo datchika vlazhnosti pochvy. *Sovremennye problemy radioelektroniki i telekommunikacij* = *Modern Problems of Radio Electronics and Telecommunications*. 2021;(4):181. (In Russ.)
6. José Antonio Hidalgo-López. A simple digital readout circuit for differential resistive or capacitive sensors. *Meas. Sci. Technol.* 2023;34(8):085117. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/acd139>
7. Reverter F. A Microcontroller-Based Interface Circuit for Three-Wire Connected Resistive Sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2022;(71):1–4. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3219492>
8. Filatov A.V., Serdyukov K.A., Novikova A.A. Prospects of Using a Modified Null Method for Temperature Measurement with Resistance Sensors. *Izmeritel'naya tekhnika* = *Measurement Techniques*. 2020;(7):51–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01824-x>

9. Piechowski L., Muc A., Iwaszkiewicz J. The Precise Temperature Measurement System with Compensation of Measuring Cable Influence. *Energies*. 2021;(14):8214. <https://doi.org/10.3390/en14248214>
10. Nagarajan P.R., George B., Kumar V.J. Improved Single-Element Resistive Sensor-to-Microcontroller Interface. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2017;(66):2736–2743. <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2712918>
11. Rerkratn A., Prombut S., Kamsri T., Riewruja V., Petchmaneelumka W. A Procedure for Precise Determination and Compensation of Lead-Wire Resistance of a Two-Wire Resistance Temperature Detector. *Sensors*. 2022;(22):4176. <https://doi.org/10.3390/s22114176>
12. Li W., Xiong S., Zhou X. Lead-Wire-Resistance Compensation Technique Using a Single Zener Diode for Two-Wire Resistance Temperature Detectors (RTDs). *Sensors*. 2020;20(9):2742. <https://doi.org/10.3390/s2009274>
13. Jos'e A. Hidalgo-Lopez. Direct interface circuits for resistive sensors affected by lead wire resistances. *Measurement*. 2023;(218):113250. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113250>
14. Bondar' O.G., Brezhneva E.O., Rodionov P.S. Mnogokanal'nyj preobrazovatel' temperatury. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2022;65(4):254–261. (In Russ.) <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2019-62-7-668-674>
15. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Botikov K.A. Research of the method for measuring temperature with a two-wire connection of a resistance thermometer. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. = Proceedings of the Southwest State University*. 2024;(28):71–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-71-87>
16. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Botikov K.A. Automatic adjustment of the parameters of the temperature measurement algorithm in a wide range. *Izmeritel'naya Tekhnika = Measuring Equipment*. 2024;(4):46–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-4-46-53>

Информация об авторах / Information about the Authors

Бондарь Олег Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: b.og@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1876-4626

Oleg G. Bondar, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: b.og@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1876-4626

Брежнева Екатерина Олеговна,
кандидат технических наук, доцент кафедры
космического приборостроения и систем связи,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: bregnevaeo@mail.ru,
ORCID: 0000-0003-0039-3425

Ekaterina O. Brezhneva, Candidate of Sciences
(Engineering), Associate Professor
of the Department of Space Instrumentation
and Communication Systems, Southwest State
University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: bregnevaeo@mail.ru,
ORCID: 0000-0003-0039-3425

Демченко Сергей Сергеевич, студент кафедры
космического приборостроения и систем связи,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: demchenko.sergey32@gmail.com,
ORCID: 0009-0004-4066-4650

Sergey S. Demchenko, Student
of the Department of Space Instrument Engineering
and Communication Systems, Southwest State
University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: demchenko.sergey32@gmail.com,
ORCID: 0009-0004-4066-4650

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-160-180>

УДК 57.087

Метод и алгоритм управления процессами принятия решений по оценке риска возникновения локальной вибрационной болезни кистей рук и сопутствующих невротических расстройств

О. А. Кныш¹, К. В. Разумова¹✉, С. Н. Родионова¹,
С. А. Филист¹, В. Н. Мишустин²

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

² Курский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. К. Маркса, д. 3, г. Курск 305041, Российская Федерация

✉ e-mail: myelectronworld@mail.ru

Резюме

Цель исследования – является повышение качества оценки степени риска вибрационной болезни у людей, контактирующих с ручным виброинструментом, и сопутствующих невротических расстройств путем использования гибридных моделей, объединяющих традиционные для профпатологии признаки с показателями уровня адаптации органов мишени на основе нечетких интеллектуальных технологий.

Методы. Исследуемый класс задач относится к плохо формализуемым задачам, с нечетким описанием структуры данных. В связи с этим в качестве базового математического аппарата выбрана нечеткая логика принятия решений, и в частности, методология синтеза гибридных нечетких решающих правил. На основании этой методологии были получены гибридные модели оценки риска появления и развития виброболезни и сопутствующих невротических расстройств, в которых наряду с традиционными для современной медицины признаками входят показатели, характеризующие адаптационный потенциал организма в целом и адаптационный потенциал органов мишени в частности.

Результаты. Для практического решения задач по оценке риска возникновения локальной вибрационной болезни кистей рук и сопутствующих невротических расстройств для соответствующей системы поддержки принятия решений был разработан алгоритм управления принятием решений, обеспечивающий повышение качества оказания медицинской помощи исследуемой категории пациентов.

С учетом значительной доли методов экспертного оценивания в синтезе моделей принятия решений и общих рекомендаций выбранной методологии было реализовано три способа проверки качества работы полученного решающего правила: экспертное оценивание; экспертное моделирование контрольной выборки и статистические испытания на репрезентативных контрольных выборках.

Заключение В ходе экспертного оценивания и экспертного моделирования контрольных выборок было установлено, что предложенный метод позволяет на 10–20% увеличить качество принимаемых решений по сравнению с моделями, не использующими показатели характеризующие адаптационный потенциал организма и уровень адаптации органов мишени. Такие же результаты были получены в ходе статистических испытаний, проводимых по общепринятым в теории распознавания правилам.

Ключевые слова: вибрационная болезнь; невротические расстройства; адаптационный потенциал; органы мишени; нечеткая модель; алгоритм управления.

© Кныш О. А., Разумова К. В., Родионова С. Н., Филист С. А., Мишустин В. Н., 2025

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление,
вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025;15(3):160–180

Для цитирования: Метод управления бригадами машин службы скорой медицинской помощи на основе использования геоинформационных систем / О. А. Кныш, К. В. Разумова, С. Н. Родионова, С. А. Филист, В. Н. Мишустин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 3. С. 160–180. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-160-180>

Поступила в редакцию 11.07.2025

Подписана в печать 10.08.2025

Опубликована 30.09.2025

A method and algorithm for managing decision-making processes for assessing the risk of local vibration disease of the hand and associated neurotic disorders

Olga A. Knysh¹, Ksenia V. Razumova¹✉, Sofia N. Rodionova¹,
Sergey A. Filist¹, Vladimir N. Mishustin²

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

² Kursk State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation
3 K. Marx Str., Kursk 305041, Russian Federation

✉ e-mail: myelectronworld@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to improve the quality of risk assessment for vibration-induced stress syndrome (VIS) and associated neurotic disorders in individuals exposed to hand-held vibrating tools by using hybrid models that combine traditional occupational pathology criteria with indicators of the adaptation level of target organs based on fuzzy intelligent technologies.

Methods. Given that the class of problems under study is poorly formalized and has an ambiguous description of the data structure, fuzzy decision logic was chosen as the basic mathematical framework, specifically a methodology for synthesizing hybrid fuzzy decision rules. This methodology was used to develop hybrid models for assessing the risk of VIS and associated neurotic disorders. These models, along with traditional modern medical criteria, include indicators characterizing the adaptive potential of the body as a whole and the adaptive potential of target organs.

Results. To address the practical challenges of assessing the risk of localized hand vibration disease and associated neurotic disorders, a decision management algorithm was developed for the corresponding decision support system, improving the quality of medical care for the studied patient population.

Given the significant use of expert evaluation methods in the synthesis of decision-making models and the general recommendations of the selected methodology, three methods were implemented to validate the performance of the resulting decision rule: expert evaluation, expert modeling of a control sample, and statistical testing on representative control samples.

Conclusion. Expert evaluation and expert modeling of control samples revealed that the proposed method enables a 10–20% improvement in the quality of decisions compared to models that do not use indicators characterizing the body's adaptive potential and the level of adaptation of target organs. The same results were obtained during statistical tests conducted according to the rules generally accepted in recognition theory.

Keywords: vibration syndrome; neurotic disorders; adaptive potential; target organs; fuzzy model; control algorithm.

Conflict of interest: The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

For citation: Knysh O.A., Razumova K.V., Rodionova S.N., Filist S.A. Mishustin V.N. A method and algorithm for managing decision-making processes for assessing the risk of local vibration disease of the hand and associated neurotic disorders. 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(3):160–180. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-160-180>

Received 11.07.2025

Accepted 10.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

Среди профессиональных заболеваний достаточно широкое распространение получила вибрационная болезнь кистей рук, связанная с удержанием виброприборов в рабочих руках [1]. В основе вибрационной болезни лежит сложный и недостаточно хорошо изученный механизм нервно-рефлекторных и нейрогуморальных нарушений, приводящих к развитию застойного возбуждения с последующими стойкими изменениями в рецепторном аппарате и центральной нервной системе (ЦНС) [2].

Недостаточная изученность патогенеза вибрационной болезни снижает потенциальные возможности современной медицины в своевременной оценке рисков появления и развития вибрационной болезни с последующим формированием адекватных мер её профилактики. Анализ литературы и собственные исследования показали, что контакт с виброприбором провоцирует появление и развитие ряда заболеваний нервной системы [3]. Кроме того, развитию невротических расстройств способствуют также и условия труда, связанные со значительным нервно-эмоциональным напряжением, специфическими позами, статико-динамическими напряжениями и др. [4].

Анализ существующих методов и средств диагностики вибрационной болезни и невротических расстройств позволяет сделать вывод о том, что в настоящее время не существует единого общепринятого стандарта по оценке рисков и подходов к диагностике вибрационной болезни и сопутствующих невротических расстройств, которые на практике в значительной степени опираются на результаты врачебного обследования и мнение врача, а не на точные количественные методы анализа [1].

С учетом сказанного разработка методов и средств, повышающих качество оценки степени риска вибрационной болезни и сопутствующих невротических расстройств, является актуальной задачей.

Материалы и методы

Анализ структуры данных, характерных для задач оценки риска исследуемых классов заболеваний, показал, что используемые факторы риска имеют нечеткую природу, а исследуемые классы заболеваний имеют области пересечений с плохо формализуемым аналитическим описанием [2]. С учетом этой особенности структуры данных для повышения качества оценки степени риска вибрационной болезни и сопутствующих

невротических расстройств было принято решение использовать технологию искусственного интеллекта вообще и гибридные нечеткие технологии в частности [5], а в качестве базового математического аппарата – использовать методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП) [6], базовыми элементами которой являются функции принадлежности к исследуемым классам состояний [7]. В работе [8] была показана перспективность использования этой технологии в профпатологии. В работе [9] предложен подход применения МСГРП к решению задач количественной оценки уровня эргономики технических систем, нашедший свое продолжение в работе [10]. В работе [11] показано успешное применение этой методологии при решении задач прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний работников агропромышленного комплекса. В работе [12] успешно решена задача прогнозирования профессиональных заболеваний в электроэнергетической отрасли. А в работе [13] решены задачи прогнозирования, ранней и дифференциальной диагностики мультицентричного ишемического поражения и т. д.

Используя метод синтеза моделей оценки степени риска вибрационной болезни, описанный в работе [2], и прогнозирования появления и развития нервных болезней, описанных в работе [3], были получены гибридные модели оценки степени риска вибрационной болезни и сопутствующих невротических расстройств.

Характерной особенностью решаемых в работе задач является взаимовлияние исследуемых классов заболеваний друг на друга. С учетом этого в решающее правило оценки риска возникновения и развития виброболезни включается функция принадлежности с базовой переменной, характеризующей риск появления и развития неврозов, и наоборот, в решающее правило оценки риска возникновения и развития неврозов включается функция принадлежности с базовой переменной, характеризующей риск появления и развития виброболезни.

Уверенность в появлении и развитии вибрационной болезни UVW описывается выражением вида

$$UVW(q+1) = UVW(q) + \\ + Q_{q+1} [1 - UVW(q)], \quad (1)$$

где $q = 1, \dots, 4$; $UVW(1) = Q_1 = UV_{\text{oab}}$; $Q_2 = UV_{\text{Kab}}$; $Q_3 = UV_{\text{tb}}$; $Q_4 = UV_{\text{Bb}}$; $Q_5 = UV_{\text{Dv}}$; UV_{oab} – уверенность в появлении и развитии виброболезни по показателю уровня адаптационного потенциала организма UAO ; UV_{Kab} – уверенность в появлении и развитии виброболезни по показателю уровня адаптации периферического кровоснабжения кисти рабочей руки UAK ; UV_{tb} – уверенность в появлении и развитии виброболезни по набору признаков, используемых в традиционной медицинской практике; UV_{Bb} – уверенность в появлении и развитии виброболезни по энергетическому разбалансу соответствующих БАТ; UV_{Dv} – уверенность в появлении и

развитии вибролезни по группам дополнительных факторов риска, включающих эргономику, экологию и индивидуальное состояние организма.

Составляющая UV_{oab} определяется функцией принадлежности к классу «высокий риск вибрационной болезни (класс $\omega_{ПВ}$) $\mu_b(UAO)$ »:

$$UV_{oab} = \mu_b(UAO). \quad (2)$$

Базовая переменная UAO определяется выражением [14]:

$$\begin{aligned} UAO(j+1) &= UAO(j) + \\ &+ f_{a\phi}(Q_q)[1 - UAO(j)], \end{aligned} \quad (3)$$

$$\mu_b(UAO) = \begin{cases} 0,3 & \text{если } UAO < 0,3, \\ 0,5 - 4(UAO - 0,3)^2, & \text{если } 0,3 \leq UAO < 0,5, \\ 3,75(UAO - 0,7)^2, & \text{если } 0,5 \leq UAO < 0,7, \\ 0, & \text{если } UAO \geq 0,7. \end{cases} \quad (4)$$

Составляющая UV_{Kab} определяется функцией принадлежности к классу «высокий риск вибрационной болезни $\mu_b(UAK)$ », где базовая переменная UAK определяется выражением:

$$UV_{Kab} = \mu_b(UAK) = \begin{cases} 0,5 & \text{если } UAK < 0,3, \\ 0,5 - 4(UAK - 0,3)^2, & \text{если } 0,3 \leq UAK < 0,55, \\ 4(UAK - 0,8)^2, & \text{если } 0,55 \leq UAK < 0,8, \\ 0, & \text{если } UAK \geq 0,8. \end{cases} \quad (6)$$

Базовые переменные нормирующих функций уровня адаптации определяются следующим образом. Показатель FS_{BK} , характеризующий функциональное состояние системы кровоснабжения верхних конечностей, определяется по формуле

$$FS_{BK} = \frac{S_i}{S_n}, \quad (7)$$

где $j = 1, 2; q = 1, 2, 3; UAO(1) = f_{a\phi}(Q_1) = f_{a\phi}(\text{ИФИ}); f_{a\phi}(Q_2) = f_{a\phi}(\text{АПЭР}); f_{a\phi}(Q_3) = f_{a\phi}(\text{АПАС}); f_{ao}(\text{ИФИ}), f_{ao}(\text{АПЭР}), f_{a\phi}(\text{АПАС})$ – нормирующие функции уровня адаптации по показателям индекса функциональных изменений (ИФИ), разбаланса биологически активных точек, относящихся к группе общесистемных (АПЭР), характеризующих функционирование антиоксидантной системы защиты (АПАС).

$$\begin{aligned} UAK &= AGK[f_{avk}(FS_{BK}), \\ &f_{avk}(FR_{BK}), f_{avk}(T_B)], \end{aligned} \quad (5)$$

где AGK – агрегатор нормирующих функций уровня адаптации; $f_{avk}(FS_{BK})$, $f_{avk}(FR_{BK})$, $f_{avk}(T_B)$ – нормирующие функции уровня адаптации.

где S_i – средняя площадь под фотоплетизмограммой (ФПГ), регистрируемой на рабочей руке за заданный промежуток времени; S_n – номинальная площадь ФПГ, определяемая на здоровой руке.

Показатель FR_{BK} , характеризующий функциональный резерв (ФР) локальной системы кровоснабжения верхних конечностей, определяется по формуле

$$FR_{BK} = \frac{S_1 - S_2}{S_H} = FS_{BK1} - FS_{BK2}, \quad (8)$$

где S_1 – средняя площадь волн ФПГ, определенная до холодовой пробы; S_2 – средняя площадь волн ФПГ определенная после холодовой пробы; FS_{BK1} – функциональное состояние локальной системы кровоснабжения верхних конечностей, определяемое до холодовой пробы; FS_{BK2} – функциональное состояние локальной системы кровоснабжения верхних конечностей, определяемое после холодовой пробы.

$$UV_{TB} = \mu_B^\Pi(Y_1) = \begin{cases} 0, & \text{если } Y_1 < 0,2, \\ 11,1(Y_1 - 0,2)^2, & \text{если } 0,2 \leq Y_1 < 0,35, \\ 0,5 - 11,1(Y_1 - 0,5)^2, & \text{если } 0,35 \leq Y_1 < 0,5, \\ 0,5, & \text{если } 0,5 \leq Y_1 < 0,7, \\ 0,5 - 6,25(Y_1 - 0,7)^2, & \text{если } 0,7 \leq Y_1 < 0,9, \\ 6,25(Y_1 - 1,1)^2, & \text{если } 0,9 \leq Y_1 < 1,1, \\ 0, & \text{если } Y_1 \geq 1,1. \end{cases} \quad (9)$$

Энергетический разбаланс для базовой переменной показателя UV_{BB} определяется выражением

$$\begin{aligned} &\text{ЕСЛИ } [(\delta R_{TR3} \geq 15\%) \text{ И } (\delta R_{TR14} \geq 15\%)] \\ &\text{ТО } [ER_{BB} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 f_R(\delta R_j)] \text{ ИНАЧЕ } (ER_{BB} = 0), \end{aligned} \quad (10)$$

где $f_R(\delta R_j)$ – нормирующие функции энергетического разбаланса для точки j , «связанной» с вибрационной болезнью с областью значения $[0, \dots, 1]$; $\delta R_1 = \delta R_{TR3}$; $\delta R_2 = \delta R_{TR14}$; $\delta R_3 = \delta R_{TR5}$.

Вопросы синтеза нечетких решающих правил по энергетическому разбалансу БАТ описаны в работе [17].

Общие вопросы синтеза нечетких моделей оценки функциональных состояний описаны в работе [15], а функционального резерва – в работе [16].

Время восстановления кровоснабжения после холодовой пробы T_B определяется как время вхождения модуля разности $|S_1 - S_2|$ в заданную экспертами «трубку» ΔS .

Для оценки составляющей UV_{TB} используется интегральный показатель Y_1 , описанный в работе [2]:

$$UV_{TB} = \mu_B^\Pi(Y_1) = \begin{cases} 0, & \text{если } Y_1 < 0,2, \\ 11,1(Y_1 - 0,2)^2, & \text{если } 0,2 \leq Y_1 < 0,35, \\ 0,5 - 11,1(Y_1 - 0,5)^2, & \text{если } 0,35 \leq Y_1 < 0,5, \\ 0,5, & \text{если } 0,5 \leq Y_1 < 0,7, \\ 0,5 - 6,25(Y_1 - 0,7)^2, & \text{если } 0,7 \leq Y_1 < 0,9, \\ 6,25(Y_1 - 1,1)^2, & \text{если } 0,9 \leq Y_1 < 1,1, \\ 0, & \text{если } Y_1 \geq 1,1. \end{cases} \quad (9)$$

В качестве дополнительных факторов риска эксперты предложили использовать показатель уверенности в появлении невротических расстройств UVN , для которого показатель UV_{DB} определяется следующим образом:

$$UV_{DB} = \mu_B(UVN) = \begin{cases} 0, & \text{если } UVN < 0,2, \\ 0,22(UVN - 0,2)^2, & \text{если } 0,2 \leq UVN < 0,5, \\ 0,4 - 0,22(UVN - 0,8)^2, & \text{если } 0,5 \leq UVN < 0,8, \\ 0,4, & \text{если } UVN \geq 0,8. \end{cases} \quad (11)$$

Уверенность в появлении и развитии нервных болезней UVN описывается выражением вида

$$UVN(q+1) = UVN(q) + R_{q+1} [1 - UVN(q)], \quad (12)$$

где $q = 1, \dots, 4$; $UVN(1) = R_1 = UV_{\text{оан}}$; $R_2 = UV_{\text{Кан}}$; $R_3 = UV_{\text{тн}}$; $R_4 = UV_{\text{Бн}}$; $R_5 = UV_{\text{Дн}}$; $UV_{\text{оан}}, UV_{\text{Кан}}, UV_{\text{тн}}, UV_{\text{Бн}}, UV_{\text{Дн}}$ – уверенности в появлении и развитии невротических расстройств по

$$UV_{\text{оан}} = \mu_h(UAO) = \begin{cases} 0,3 & \text{если } UAO < 0,3, \\ 0,5 - 4(UAO - 0,3)^2 & \text{если } 0,3 \leq UAO < 0,5, \\ 3,75(UAO - 0,7)^2 & \text{если } 0,5 \leq UAO < 0,7, \\ 0 & \text{если } UAO \geq 0,7. \end{cases} \quad (13)$$

$$UV_{\text{Кан}} = \mu_h(UAN) = \begin{cases} 0,4 & \text{если } UAN < 0,3, \\ 0,4 - 5(UAN - 0,3)^2 & \text{если } 0,3 \leq UAN < 0,5, \\ 5(UAN - 0,7)^2 & \text{если } 0,5 \leq UAN < 0,7, \\ 0 & \text{если } UAN \geq 0,7. \end{cases} \quad (14)$$

Показатель $UV_{\text{тн}}$ заимствован из работы [3]. Частное решающее правило определения уверенности в появлении и развитии нервных болезней $UV_{\text{Бн}}$ по группе БАТ, связанных с нервной

$$UV_{\text{Дн}} = \mu_h(UVW) = \begin{cases} 0 & \text{если } UVW < 0,2, \\ 2,78(UVW - 0,2)^2 & \text{если } 0,2 \leq UVW < 0,5, \\ 0,5 - 2,78(UVW - 0,8)^2 & \text{если } 0,5 \leq UVW < 0,8, \\ 0,5 & \text{если } UVW \geq 0,8. \end{cases} \quad (16)$$

Результаты и их обсуждение

Анализ известных систем поддержки принятия решений (СППР) и их баз знаний показал, что для практического решения задач по оценке риска возникновения локальной вибрационной болезни кистей рук и сопутствующих невротических расстройств можно использовать универсальную программную оболочку разработки кафедры БМИ ЮЗГУ [18].

показателям UAO , адаптационного потенциала нервной системы (UAN), по традиционным факторам риска, по энергетическому разбалансу соответствующих БАТ, по группам дополнительных факторов риска, включающих эргономику, экологию и индивидуальное состояние организма. Для выражения (12) получен следующий набор частных решающих правил:

системой, определяется функцией принадлежности $\mu_h(ER_{\text{hp}})$:

$$UV_{\text{Бн}} = \mu_h(ER_{\text{hp}}). \quad (15)$$

Показатель $UV_{\text{Дн}}$ представлен моделью расчета UVW :

Однако алгоритм управления принятием решений и решающие модули базы знаний должны соответствовать типам решаемых в работе задач, что требует разработки оригинального алгоритма управления и соответствующей структуры базы знаний СППР.

С учетом особенностей решаемых в работе задач разработан обобщенный алгоритм принятия решений, приведенный ниже (рис. 1).

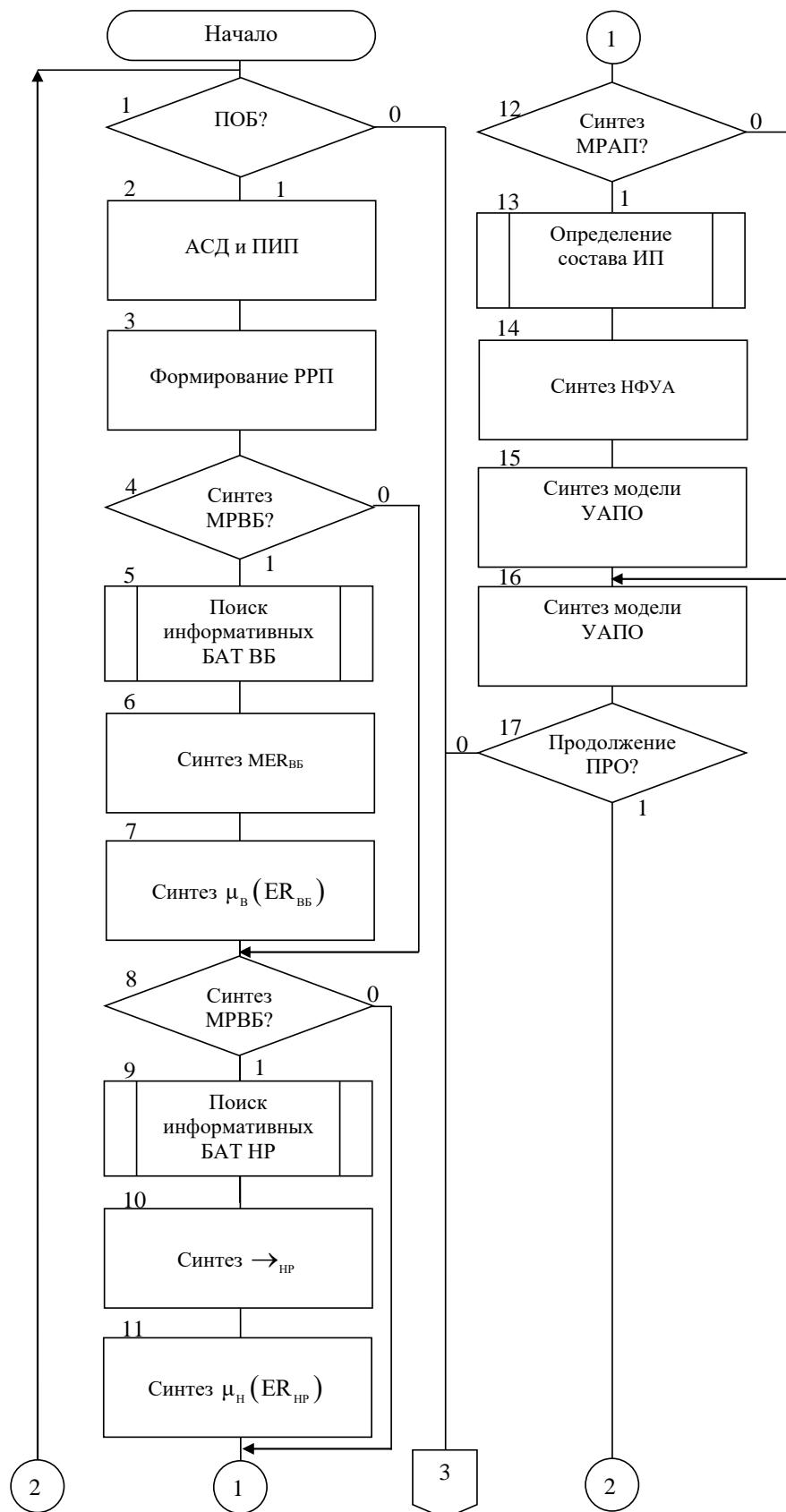


Рис. 1. Схема алгоритма управления (продолжение и окончание на с. 168–170)

Fig. 1. Scheme of the control algorithm (continued and ended on pages 168–170)

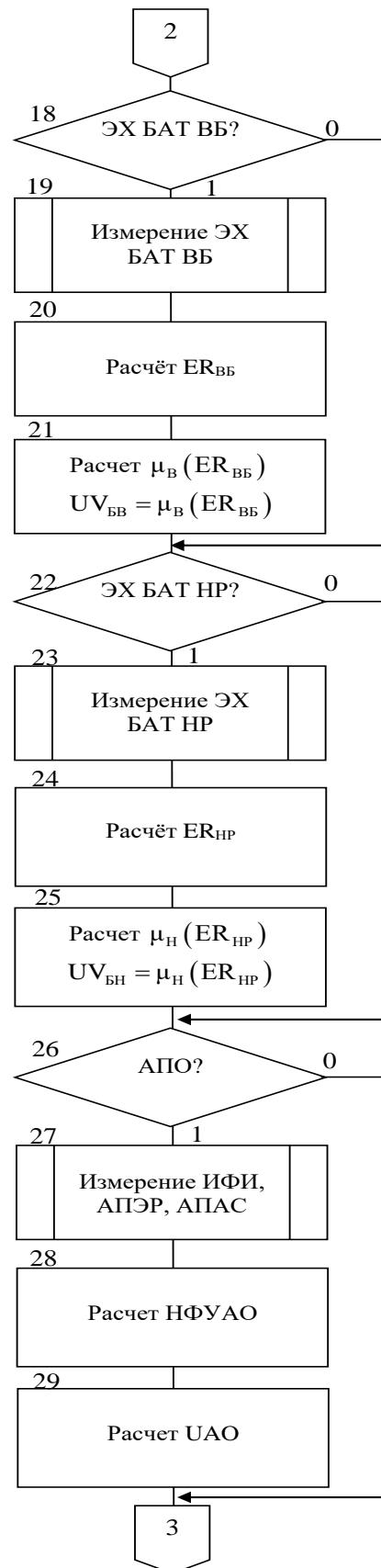


Рис. 1. Продолжение (начало см. на с. 167, окончание на с. 170)

Fig. 1. Continued (see beginning on page 167, ending on page 170)

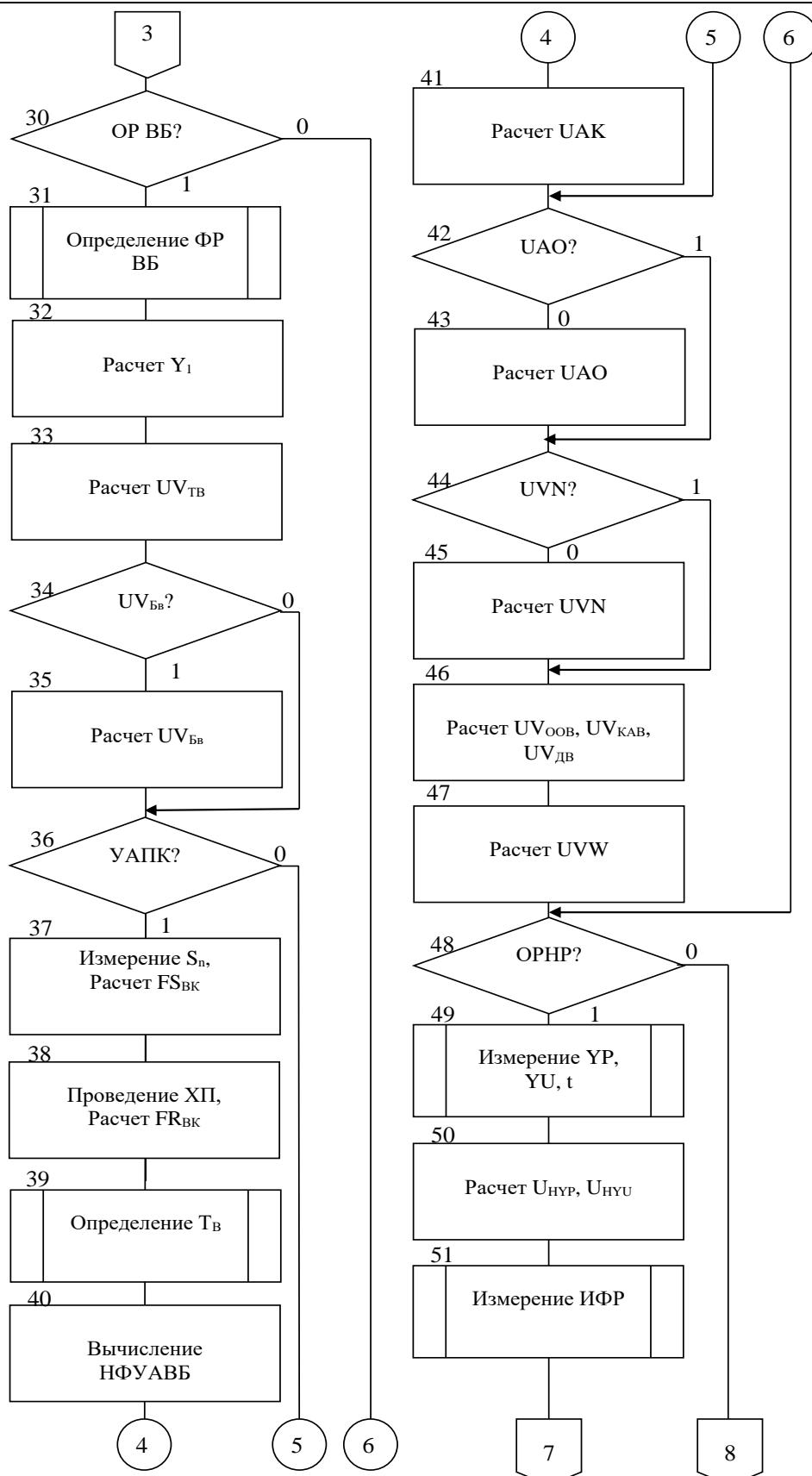


Рис. 1. Продолжение (начало см. на с. 167–168, окончание на с. 170)

Fig. 1. Continued (beginning on pp. 167–168, ending on p. 170)

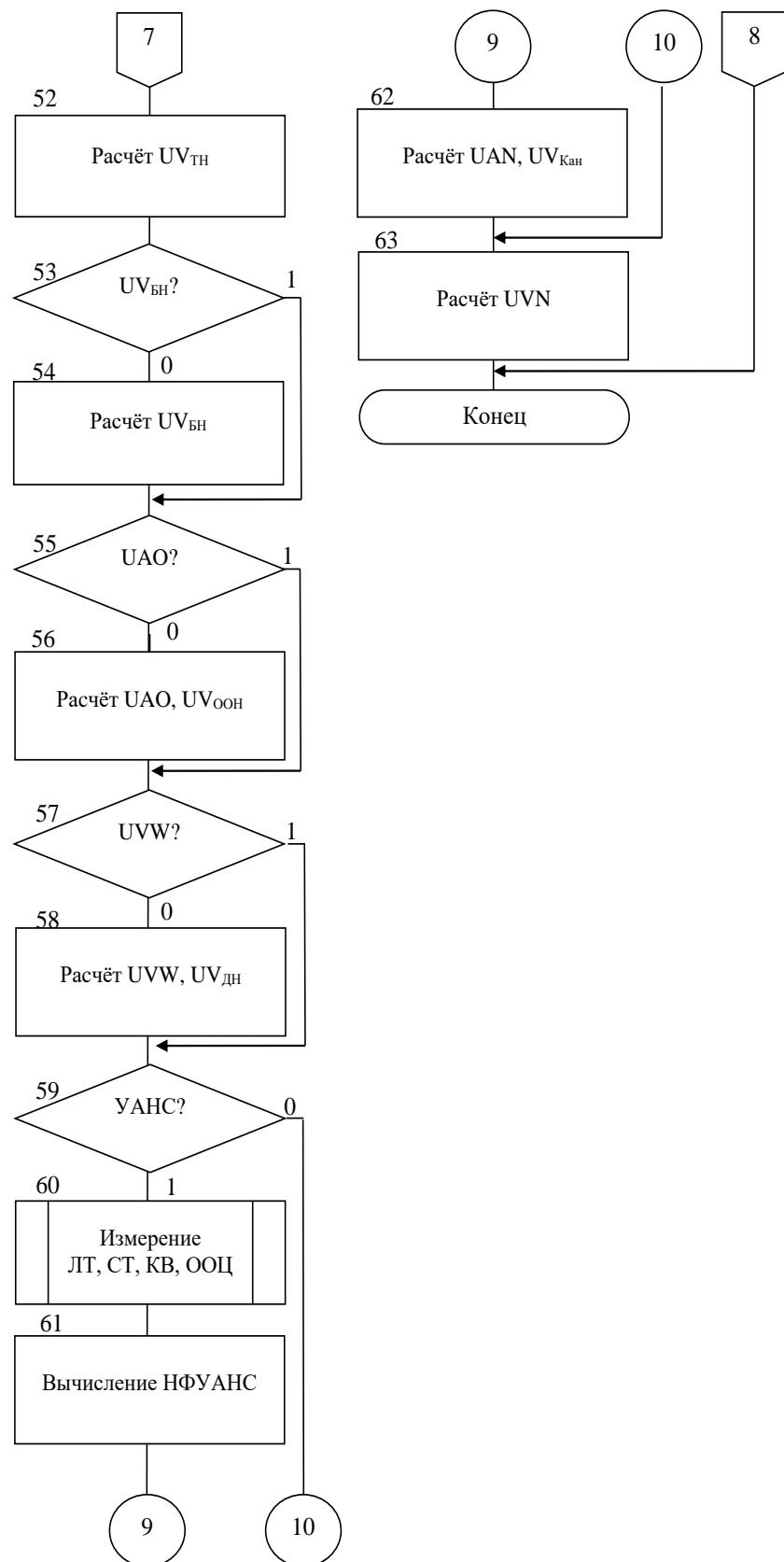


Рис. 1. Окончание (начало см. на с. 167–169)

Fig. 1. The end (see the beginning on pages 167–169)

В современной теории распознавания образов принято перед выбором моделей принятия решений проводить анализ структуры данных с целью поиска наиболее адекватного метода синтеза решающих правил. В ряде работ этот этап исследования называют разведочным анализом (РА) [19]. С учетом выбранной методологии синтеза решающих правил в рамках нечеткой парадигмы при реализации процедуры обучения (ПОБ, блок 1) осуществляется анализ структуры данных (АСД) с формированием пространства информативных признаков (ПИП, блок 2). На этом же этапе исследований формируются рекомендации по выбору элементов и параметров решающих правил и способов их агрегации (РРП, блок 3).

Одной из составляющих решающих правил являются модели оценки степени риска вибрационной болезни (МРВБ) и невротических расстройств (МРНР) по энергетическому разбалансу биологически активных точек. Если решается задача синтеза МРВБ (блок 4), то по атласам меридиан определяется список БАТ, «связанных» с вибрационной болезнью и с использованием метода, описанного в работе [17], определяются информативные и диагностически значимые точки (блок 5). Далее последовательно осуществляется синтез модели оценки энергетического разбаланса информативных БАТ, «связанных» с вибрационной болезнью (блок 6, модель 10), и определяются функции принадлежности к классу высокий риск

вибрационной болезни $\mu_v (ER_{VB})$ (блок 7). Аналогично решается задача синтеза МРНР (блоки 8–11).

Второй важной составляющей финальных моделей является модель оценки адаптационного потенциала организма на общесистемном уровне (МОАП) При синтезе этой модели (блок 12) определяется состав информативных показателей (ИП) для оценки уровня адаптационного потенциала организма (УАПО, блок 13), осуществляется синтез нормирующих функций уровня адаптации (НФУА, блок 14), и методом их агрегации получают искомую модель (блок 15). На завершающем этапе осуществляется синтез гибридных моделей оценки степени риска вибрационной болезни и невротических расстройств у врачей стоматологов, контактирующих с виброИнструментом (ГМВБН, блок 16).

Контроль за окончанием процесса обучения (ПРО) осуществляется в блоке 17.

При решении задач оценки степени риска вибрационной болезни и невротических расстройств у врачей-стоматологов предлагаемый алгоритм учитывает то, что решение об искомых рисках может приниматься как с использованием всего состава информативных показателей, так и при отсутствии части из них с естественным снижением уровня доверия к получаемым оценкам [19].

Если для оценки степени риска появления и развития виброболезни используются энергетические характеристики БАТ, связанные с виброболезнью по

энергетическому разбалансу биологически активных точек (ЭХБАТВБ, блок 18), то измеряются сопротивления точек TR3, TR5 и TR14 (блок 19) и по формуле (10) производится расчет соответствующего энергетического разбаланса (блок 20) и вычисляется функция принадлежности к классу высокий риск вибрационной болезни μ_{B} (ER_{B}) (блок 21), определяющая частную уверенность в том, что у стоматолога появится вибрационная болезнь UV_{B} . Аналогично определяется частная уверенность UV_{Bh} , что у стоматолога разовьется нервное расстройство (блоки 22–25).

Если для оценки степени риска выбранной патологии используется адаптационный потенциал организма (АПО, блок 26), то производится измерение индекса функциональных изменений (ИФИ); адаптационного потенциала, определяемого по энергетическому разбалансу общесистемных БАТ (АПЭР), и адаптационного потенциала, определяемого по состоянию антиоксидантной системы защиты (АПАС) (блок 27), с последующим определением нормирующих функций уровня адаптации организма (НФУАО): f_{ao} (ИФИ), f_{ao} (АПЭР), f_{af} (АПАС) (блок 28), далее – используя нечеткую модель (3), вычисляется уровень АПО (показатель UAO , блок 29).

При оценке степени риска вибрационной болезни (ОРВБ) по максимальному набору информативных признаков (блок 30) производится определение факторов риска вибрационной болезни (ФРВБ) по традиционному для

профпатологии их списку (блок 31) с расчетом интегрального показателя Y_1 [2] (блок 32) и уверенности в риске появления и развития виброболезни UV_{TB} (модель 9, блок 33). Если на предыдущих этапах расчет UV_{B} (оценка уверенности в возникновении виброболезни по энергетическому разбалансу БАТ) не выполнялся (блок 34), а пользователь решает его использовать в оценке риска ВБ, то реализуется блок 35, выполняющий те же расчеты, что и блоки 19–21.

Если принимается решение использовать показатель уровня адаптации периферического кровоснабжения кисти рабочей руки (УАПК, блок 36), то определяется интенсивность кровоснабжения исследуемой конечности по средней площади под регистрируемой фотоплетизмограммой (ФПГ) S_i за заданный промежуток времени t_i и с использованием модели (7) рассчитывается количественная характеристика ФС локальной системы кровоснабжения верхних конечностей FS_{Bk} (блок 37). Далее организуется проведение холодовой пробы (ХП) с расчетом величины функционального резерва (модель 8, блок 38), определяется время восстановления кровоснабжения после холодовой пробы T_{B} (блок 39), вычисляются нормирующие функции уровня адаптации по отношению к виброболезни (НФУАВБ): $f_{avk}(FS_{\text{Bk}})$, $f_{avk}(FR_{\text{Bk}})$, $f_{avk}(T_{\text{B}})$ (блок 40), которые агрегируются в модель расчета уровня адаптационного потенциала локальной системы кровоснабжения верхних конечностей

UAK (модель 5, блок 41). Если на предыдущих этапах расчет *UAO* не выполнялся (блок 42), а пользователь решает его использовать в оценке риска ВБ, то реализуется блок 43, выполняющий те же расчеты, что и блоки 27–29.

Если на предыдущих этапах расчет *UVN* не выполнялся (блок 44), а пользователь решает его использовать в оценке риска ВБ, то реализуется блок 45, выполняющий расчет показателя уверенности в риске появления и развития нервных болезней. Если в расчетах используются показатели *UAK*, *UAO* и (или) *UVN*, то, используя модели (2), (6) и (или) (11), для них определяются величины UV_{oab} , UV_{Kab} *YP* и (или) UV_{Dv} (блок 46), по которым рассчитывается уверенность в риске возникновения виброболезни у стоматологов *UVW* (модель 1, блок 47).

При оценке степени риска нервных расстройств (ОРНР) по максимальному набору информативных признаков (блок 48) производится определение текущего уровня утомления *YU* [20] и ПЭН *YP* [21], время их воздействия *t*, которые, в свою очередь, определяют прогностическую уверенность в классе по факторам длительное ПЭН *UHYP* и утомление *UHYU* (блоки 49, 50).

Производится определение индивидуальных факторов риска ИФР, по которым определяется уверенность в появлении и развитии нервных болезней UV_{th} по группе индивидуальных факторов риска (блоки 51, 52). Если на предыдущих этапах расчет UV_{Bn} не выполнялся

(оценка уверенности в возникновении нервных болезней по энергетическому разбалансу БАТ) (блок 53), а пользователь решает его использовать в оценке риска нервных расстройств, то реализуется блок 54, выполняющий те же расчеты, что и блоки 23–25.

Если на предыдущих этапах расчет *UAO* не выполнялся (блок 55), а пользователь решает его использовать в оценке риска нервных расстройств, то реализуется блок 56, выполняющий те же расчеты, что и блоки 27–29, и расчет показателя UV_{oan} (модель 13).

Если на предыдущих этапах расчет *UVW* не выполнялся (блок 57), а пользователь решает его использовать в оценке риска нервных расстройств, то реализуется блок 58, выполняющий расчет показателя уверенности в риске появления и развития виброболезни (блок 30) и расчет показателя UV_{Dn} (модель 16).

Если пользователь решил использовать показатель уровня адаптации нервной системы (УАНС, блок 59), то фиксируются результаты выполнения тестов «личная тревожность» ЛТ и «ситуативная тревожность» СТ, определяются показатель концентрации внимания КВ и характеристика оперативной памяти, определяемая по методике «определение отсутствующей цифры» ООЦ (блок 60), вычисляются нормирующие функции уровня адаптации НС (блок 61), определяется уровень адаптационного потенциала нервной системы и показатель UV_{Kan} (модель 14) (блок 62). Оценка

уверенности в риске возникновения нервных болезней у стоматологов *UVN* реализуется блоком 63 (модель 12).

Проверка качества работы полученных моделей принятия решений и алгоритма принятия решений осуществлялась по трехуровневой схеме. На первом уровне производилась экспертная оценка уровня доверия к прогностическим моделям (1) и (12).

На втором уровне эксперты составляли контрольные выборки, в которые включались объекты, в классификации которых не было сомнений на общепринятом уровне, и объекты со значениями факторов риска, которые, по мнению экспертов, равновероятно можно отнести как к одному, так и к другому исследуемому классу состояний. По этим выборкам определялось количество правильных и ошибочных «срабатываний» исследуемых решающих правил (модели 1 и 12) и рассчитывались общепринятые в медицинских исследованиях показатели качества: диагностическая чувствительность (ДЧ); специфичность (ДС); диагностическая эффективность

(ДЭ); прогностическая значимость положительных (PZ^+) и отрицательных (PZ^-) результатов, которые превысили величину 0,9.

Третий уровень проводился на презентативных контрольных выборках с использованием независимых общепринятых методов исследования. Объем контрольной выборки определяется в соответствии с требованиями, принятыми в теории распознавания образов, и составил 100 человек на класс. Качество классификации проверялось по показателям ДЧ, ДС, ДЭ, PZ^+ и PZ^- .

Выводы

В ходе проведенных исследований было показано, что модели прогноза вибрационной болезни и невротических расстройств у людей, контактирующих с виброинструментом, обеспечивают уверенность в правильном принятии решения на уровне 0,93 и выше на трехлетний период, что является приемлемым практическим результатом для задач прогнозирования с нечеткой структурой классов.

Список литературы

1. Федотова Ю. М., Костюкова Ю. И. Профессиональные заболевания врача-стоматолога // Научное обозрение. Медицинские науки. 2017. № 2. С. 19–21.
2. Оценка риска появления и развития виброболезни у стоматологов на основе нечеткой логики принятия решений / О. А. Кныш, С. Н. Родионова, Л. В. Стародубцева, Т. Н. Волобуева // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2025. Т. 11, № 2. С. 515–521.
3. Математические модели прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы, провоцируемых комбинированным воздействием разнородных факторов риска / Т. Н. Говорухина, М. А. Мясоедова, И. Ю. Григоров, А. В. Поляков //

Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 2. С. 110–116. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.18.2.022>

4. Метод диагностики преходящих невротических расстройств на основе нечетких гибридных моделей / Р. И. Сафонов, О. А. Кныш, С. Н. Родионова, Л. В. Стародубцева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 11, № 2. С. 120–137.

5. Кореневский Н. А., Сафонов Р. И., Серебровский В. И. Системы поддержки принятия решений врачей профпатологов с гибридной нечеткой сетевой базой знаний: монография. Курск: Курская государственная аграрная академия имени И. И. Иванова, 2021. 333 с.

6. Кореневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.

7. Кореневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1 (289). С. 33–35.

8. Сафонов Р. И., Стародубцева Л. В., Крикунова Е. В. Перспективы применения мягких вычислений и информационных технологий в профпатологии: монография. Курск: Издательство Курской государственной аграрной академии имени И. И. Иванова, 2018. 232 с.

9. Method of ergonomics assessment of technical systems and its influence on operators heath on basis of hybrid fuzzy models / R. T. Al-Kasasbeh, M. S. Alshamasin, N. Korenevskii, I. Maksim // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. N 590. P. 581–592.

10. Fuzzy model evaluation of vehicles ergonomics and its influence on occupational diseases / R. T. Al-Kasasbeh, M. S. Alshamasin, N. Korenevskiy, S. Korenevskya, E. T. Al-Kasasbeh, I. Maksim // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. N 792. P. 143–154.

11. Использование технологий мягких вычислений для прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний работников агропромышленного комплекса монография / Н. А. Кореневский, А. В. Серебровский, Р. В. Степашов, Т. Н. Говорухина. Курск: Курская государственная аграрная академия имени И. И. Иванова, 2016. 224 с.

12. Математические модели оценки влияния электромагнитных полей на появление и развитие профессиональных заболеваний в электроэнергетической отрасли / М. А. Мясоедова, Н. А. Кореневский, Л. В. Стародубцева, М. В. Писарев // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7, № 2. С. 27–42. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.25.2.013>

13. Бокерия Л. А., Быков А. В., Кореневский Н. А. Оптимизация ведения пациентов с мультицентричным ишемическим поражением на базе нечетких интеллектуальных технологий: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 400 с.
14. Использование показателей, характеризующих адаптационные механизмы для оценки уровня защиты организма от воздействия внешних факторов риска / Р. И. Сафонов, С. Н. Родионова, Е. В. Крикунова, Л. В. Стародубцева, С. С. Сергеева, А. В. Титова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 4. С. 163–179.
15. Кореневский Н. А., Титова А. В., Сурнина А. И. Оценка влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на функциональное состояние и работоспособность операторов на основе технологии мягких вычислений // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 2. С. 120–137.
16. Бойцова Е. А., Шуткин А. Н., Магеровский М. А. Оценка уровня функциональных резервов организма на основе технологий мягких вычислений и модели Г. Раша // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2017. Т. 14, № 3. С. 577–584.
17. Кореневский Н. А., Крупчатников Р. А., Аль-Касасбех Р. Т. Теоретические основы биофизики акупунктуры с приложениями в медицине, психологии и экологии на основе нечетких сетевых моделей: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2020. 528 с.
18. Оценка и управление состоянием здоровья обучающихся на основе гибридных интеллектуальных технологий: монография / Н. А. Кореневский, А. Н. Шуткин, С. А. Горбатенко, В. И. Серебровский. Старый Оскол: ТНТ, 2016. 472 с.
19. Метод комплексной оценки уровня информативности классификационных признаков в условиях нечеткой структуры данных / Н. А. Кореневский, В. В. Аксенов, С. Н. Родионова, С. Н. Гонтарев, Л. П. Лазурина, Р. И. Сафонов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. № 3. С. 80–96.
20. Шуткин А. Н., Бойцова Е. А., Стародубцева Л. В. Оценка уровня утомления с использованием теории измерения латентных переменных // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2015. Т. 14, № 3. С. 553–561.
21. Математические модели прогнозирования и ранней диагностики заболеваний неравной системы, провоцируемых комбинированным воздействием разнородных факторов риска / Т. Н. Говорухина, М. А. Мясоедова, И. Ю. Григоров, А. В. Поляков // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 2. С. 145–153.

References

1. Fedotova Y.M., Kostyukova Y.I. Occupational diseases of dentists. *Scientific Review. Medical Sciences.* 2017;(2):19–21. (In Russ.)
2. Knysh O.A., Rodionova S.N., Starodubtseva L.V., Volobuyeva T.N. Assessment of the risk of occurrence and development of vibration disease in dentists based on fuzzy logic of decision-making. *Sistemnyy analiz i upravleniye v biomeditsinskikh sistemakh = Systems Analysis and Control in Biomedical Systems.* 2025;11(2):515–521. (In Russ.)
3. Govorukhina T.N., Myasoyedova M.A., Grigorov I.YU., Polyakov A.V. Mathematical models for forecasting and early diagnosis of nervous system diseases caused by the combined effects of heterogeneous risk factors. *Sistemnyy analiz i upravleniye v biomeditsinskikh sistemakh = Systems Analysis and Control in Biomedical Systems.* 2019;18(2):110–116. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.18.2.022>
4. Safronov R.I. Knysh O.A., Rodionova S.N., Starodubtseva L.V. Method for diagnosing transient neurotic disorders based on fuzzy hybrid models. *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;11(2):120–137. (In Russ.)
5. Korenevskiy N.A., Safronov R.I., Serebrovskii V. I. Decision support systems for occupational pathologists with a hybrid fuzzy network knowledge base. Kursk: Kurskaya gosudarstvennaya agrarnaya akademiya imeni I.I. Ivanova; 2021. 333 p. (In Russ.)
6. Korenevskiy N.A., Rodionova S.N., Khripina I.I. Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems. Stary Oskol: TNT; 2019. 472 p. (In Russ.)
7. Korenevskiy N.A. Using fuzzy logic for decision-making for medical expert systems. *Meditinskaya tekhnika = Medical Equipment.* 2015;(1):33–35. (In Russ.)
8. Safronov R.I., Starodubtseva L.V., Krikunova E.V. Prospects for the Application of Soft Computing and Information Technologies in Occupational Pathology. Kursk: Izdatel'stvo Kurskoi gosudarstvennoi agrarnoi akademii imeni I.I. Ivanova, 2018. 232 p.
9. Al-Kasasbeh R.T., Alshamasin M.S., Korenevskiy N., Maksim I. Method of ergonomics assessment of technical systems and its influence on operator health based on hybrid fuzzy models. *Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2018;(590):581–592.
10. Al-Kasasbeh R.T., Alshamasin M.S., Korenevskiy N., Korenevskya S., Al-Kasasbeh E.T., Maksim I. Fuzzy model evaluation of vehicles ergonomics and its influence on occupational diseases. *Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2019;(792):143–154.
11. Korenevskiy N.A., Serebrovskij A.V., Stepashov R.V., Govoruhina T.N. Using soft computing technologies to predict and diagnose occupational diseases of workers in the agro-industrial complex. Kursk: Kurskaya gosudarstvennaya agrarnaya akademiya imeni I.I. Ivanova; 2016. 224 p. (In Russ.)

12. Myasoedova M.A., Korenevskiy N.A., Starodubceva L.V., Pisarev M.V. Mathematical models for assessing the influence of electromagnetic fields on the occurrence and development of occupational diseases in the electric power industry. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii = Modeling, Optimization And Information Technology.* 2019;7(2):27–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.25.2.013>
13. Bokeria L.A., Bykov A.V., Korenevskiy N.A. Optimization of patient management with multicentric ischemic lesions based on fuzzy intelligent technologies. Staryj Oskol: TNT; 2019. 400 p. (In Russ.)
14. Safronov R.I., Rodionova S.N., Krikunova E.V., Starodubtseva L.V., Sergeeva S.S., Titova A.V. Use of indicators characterizing adaptive mechanisms to assess the level of the body's protection from the influence of external risk factors. *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.* 2021;11(4):163–179. (In Russ.)
15. Korenevsky N.A., Titova A.V., Surnina A.I. Assessment of the influence of electromagnetic fields of the radio frequency range on the functional state and performance of operators based on soft computing technology. *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.* 2021; 11(2):120–137. (In Russ.)
16. Boytsova E.A., Shutkin A.N., Magerovsky M.A. Assessment of the level of functional reserves of the body based on soft computing technologies and G. Rasch's model. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = Systems Analysis and Control in Biomedical Systems.* 2017;14(3):577–584. (In Russ.)
17. Korenevskiy N.A., Krupchatnikov R.A., Al-Kasasbeh R.T. Theoretical foundations of the biophysics of acupuncture with applications in medicine, psychology, and ecology based on fuzzy network models. Stary Oskol: TNT; 2020. 528 p. (In Russ.)
18. Korenevskiy N.A., Shutkin A.N., Gorbatenko S.A., Serebrovsky V.I. Assessment and management of students' health based on hybrid intelligent technologies. Stary Oskol: TNT; 2016. 472 p. (In Russ.)
19. Korenevsky N.A., Aksenov V.V., Rodionova S.N., Gontarev S.N., Lazurina L.P., Safronov R.I. Method for comprehensive assessment of the level of information content of classification features in conditions of fuzzy data structure. *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.* 2023;(3):80–96. (In Russ.)

20. Shutkin A.N., Boytsova E.A., Starodubtseva L.V. Assessing the level of fatigue using the theory of measuring latent variables. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskix sistemах = Systems Analysis and Management in Biomedical Systems.* 2019;18(2):145–153. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Кныш Ольга Анатольевна, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ol.knish@yandex.ru

Разумова Ксения Викторовна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: myelectronworld@mail.ru
ORCID: 0009-0007-7942-8083

Родионова Софья Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: knsofia@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-4477-3975, Scopus ID: 57195455825, WOS ID: Q-1060-2017

Филист Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры биомедицинской инженерии Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: SFilist@gmail.com, Researcher ID: F-8112-2013, ORCID: 0000-0003-1358-671X, Scopus ID: 6603139063,

Olga A. Knysh, Postgraduate of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ol.knish@yandex.ru

Ksenia V. Razumova, Candidate of Sciences (Engineering), Senior Lecturer of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: myelectronworld@mail.ru, ORCID: 0009-0007-7942-8083

Sofia N. Rodionova, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: knsofia@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-4477-3975, Scopus: ID 57195455825, WOS ID: Q-1060-2017

Sergey A. Filist, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: SFilist@gmail.com, Researcher ID: F-8112-2013, ORCID: 0000-0003-1358-671X, Scopus ID: 6603139063,

Мишустин Владимир Николаевич, доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры хирургических болезней института непрерывного образования, Курский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vladimirshef2011@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-4104-5681

Vladimir N. Mishustin, Doctor of Sciences (Medical), Associate Professor, Professor of the Department of Surgical Diseases at the Institute of Continuing Education, Kursk State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Kursk, Russian Federation, e-mail: vladimirshef2011@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-4104-5681

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-181-200>



УДК 614.8:078.351

Система поддержки принятия решений при прогнозировании и диагностике эндометрита в послеродовом периоде

Б. В. Аксёнов¹✉, С. П. Серегин¹, С. А. Громыко¹,
С. В. Петров², А. В. Хардиков^{2,3}, А. С. Петрова³

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

²Клинический медицинский центр «Доктор Петров»
ул. Павлуновского, д. 114, г. Курск 305040, Российская Федерация

³Курский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. К. Маркса, д. 3, г. Курск 305041, Российская Федерация

✉ e-mail: aksenchik777@gmail.com

Резюме

Целью исследования является разработка системы поддержки принятия решений для врача-гинеколога, основанной на синтезированных прогностических и диагностических решающих правилах, которая будет использована при диагностике и прогнозировании послеродового эндометрита.

Методы. При разработке системы поддержки принятия решений был использован следующий инструментарий: медицинская статистика, методы разработки экспертных систем, теория принятия решений и методы распознавания образов. Для обработки и анализа медицинских данных, а также для проверки решающих диагностических правил применялись такие инструменты для статистического анализа данных, как Excel и Statistica. Для оценки риска послеродового эндометрита и его диагностики включен 31 признак, ранжированный по степени их информативности. Эти данные использованы в качестве основы для разработки алгоритма прогнозирования риска развития послеродового эндометрита в системе поддержки принятия решений.

Результаты. Применение разработанных диагностических решающих правил на клинически рецензентивном материале показало диагностическую эффективность $0,96 \pm 0,02$. Разработанная экспертная система может эффективно применяться в клинических условиях. Также возможно использование данной экспертной системы в учебном процессе при подготовке медицинских работников.

Заключение. Учет факторов риска, интеграция данных из различных источников, использование прогностических моделей и формирование индивидуальных рекомендаций по лечению и профилактике – все это ключевые аспекты, которые должны быть учтены при разработке такой системы. Внедрение подобной системы в клиническую практику может значительно улучшить качество диагностики и лечения послеродового эндометрита, снизить риск осложнений и улучшить исходы для пациенток.

© Аксёнов В. В., Серегин С. П., Громыко С. А., Петров С. В., Хардиков А. В., Петрова А. С., 2025

Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering,
Information Science. Medical Instruments Engineering. 2025;15(3):181–200

Ключевые слова: система поддержки принятия решений; прогнозирование; диагностика; послеродовой эндометрит.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Для цитирования: Система поддержки принятия решений при прогнозировании и диагностике эндометрита в послеродовом периоде / В. В. Аксёнов, С. П. Серегин, С. А. Громыко, С. В. Петров, А. В. Хардиков, А. С. Петрова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 3. С. 181–200. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-181-200>

Поступила в редакцию 05.07.2025

Подписана в печать 04.08.2025

Опубликована 30.09.2025

Decision support system for prediction and diagnosis of endometritis in the postpartum period

**Vitaliy V. Aksenov¹✉, Stanislav P. Seregin¹, Svetlana A. Gromiko¹,
Sergey V. Petrov², Aleksandr V. Khardikov^{2,3}, Arina S. Petrova³**

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

² Dr. Petrov Clinical Medical Center
114 Pavlunovsky Str., Kursk 305040, Russian Federation

³ Kursk State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation
3 K. Marx Str., Kursk 305041, Russian Federation

✉ e-mail: aksenchik777@gmail.com

Abstract

The purpose of the research is to develop a decision support system for gynecologists, based on synthesized prognostic and diagnostic decision rules, which will be used in the diagnosis and prognosis of postpartum endometritis.

Methods. The following tools were used in the development of the decision support system: medical statistics, expert system development methods, decision theory, and pattern recognition methods. Such tools for statistical data analysis as Excel and Statistica were used to process and analyze medical data, as well as to verify crucial diagnostic rules. To assess the risk of postpartum endometritis and its diagnosis, 31 signs are included, ranked according to their degree of informativeness. These data were used as the basis for the development of an algorithm for predicting the risk of developing postpartum endometritis in a decision support system.

Results. The application of the developed diagnostic decision rules on clinically representative material showed a diagnostic effectiveness of $0,96 \pm 0,02$. The developed expert system can be effectively applied in clinical conditions. It is also possible to use this expert system in the educational process when training medical professionals.

Conclusion. Consideration of risk factors, integration of data from various sources, the use of prognostic models and the formation of individual recommendations for treatment and prevention are all key aspects that should be taken into account when developing such a system. The introduction of such a system into clinical practice can significantly improve the quality of diagnosis and treatment of postpartum endometritis, reduce the risk of complications and improve patient outcomes.

Keywords: decision support system; forecasting; diagnosis; postpartum endometritis.

Conflict of interest: The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

For citation: Aksenov V.V., Seregin S.P., Gromyko S.A., Petrov S.V., Khardikov A.V., Petrova A.S. Decision support system for prediction and diagnosis of endometritis in the postpartum period. *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(3):181–200. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-181-200>

Received 05.07.2025

Accepted 04.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

В настоящее время сепсис и септический шок занимают четвертое место в мире в структуре материнской смертности (Клинические рекомендации МЗ РФ «Септические осложнения в акушерстве») [1]. В 90–95% случаев причиной сепсиса и шока является послеродовой эндометрит (ПЭ), который остается одной из наиболее распространенных форм послеродовой инфекции [2]. Частота ПЭ варьируется в зависимости от типа родов: после самопроизвольных родов она составляет 1–5%, после патологических родов – 15–20%, а после кесарева сечения – более 20% [3]. У женщин с высоким инфекционным риском частота ПЭ может достигать 80,4% [4]. В случаях сочетания нескольких факторов риска вероятность развития ПЭ возрастает до 91% [5]. Достаточно часто латентный период на начальном этапе ПЭ протекает под видом лохиометры или субинволюции матки, и только когда процесс выходит за рамки локальной инфекции, начинаются героические усилия по спасению жизни матери [6]. Эти данные подчеркивают масштаб проблемы и необходимость поиска новых подходов к ее решению [7].

В контексте этих вызовов разработка системы поддержки принятия решений (СППР) для прогнозирования послеродового эндометрита представляется крайне актуальной [8]. Такая система могла бы интегрировать данные о множестве факторов риска, включая анамнез пациентки, особенности течения беременности и родов, состояние иммунной системы [9], а также микробиологические и клинические показатели [10]. Это позволило бы не только более точно оценивать индивидуальный риск развития ПЭ [11], но и разрабатывать персонализированные стратегии профилактики и лечения [12].

Целью исследования является разработка системы поддержки принятия решений при прогнозировании и диагностике эндометрита в послеродовом периоде на основе синтезированных прогностических и диагностических решающих правил.

Материал и методы

Для реализации цели использованы методы теории принятия решений, теории распознавания образов, разработка экспертных систем (ЭС) и медицинская статистика, принципы самоорганизации моделирования. В качестве инструментария

разведочного анализа и верификации решающих диагностических правил применялись пакеты Excel и Statistica. Учитывая то, что в качестве математического инструментария были выбраны модели, основанные на нечеткой принадлежности, было решено использовать универсальную программную платформу, разработанную на кафедре биомедицинской инженерии ЮЗГУ [13]. За основу взята экспертная система оценки риска возникновения и развития тромбоэмболизма [14]. Данная система адаптирована для прогнозирования ПЭ и внедряется в Клинический медицинский центр «Доктор Петров».

Для оценки риска ПЭ и его диагностики включен 31 признак, ранжированный по степени их информативности. Эти данные использованы в качестве основы для разработки алгоритма прогнозирования риска развития ПЭ в системе поддержки принятия решений. Система может автоматически рассчитывать суммарный балл риска на основе данных, введенных врачом, и выдавать рекомендации по дальнейшему наблюдению или лечению. Например, при высоком риске развития ПЭ система может рекомендовать более частый мониторинг состояния пациентки.

Каждый из 31 признаков имеет свой диагностический коэффициент, отражающий степень его влияния на риск развития ПЭ. Эти признаки охватывают различные аспекты здоровья женщины, анамнез, течение беременности, клинику родов и послеродового периода.

Подробно рассмотрим каждый из этих признаков и их диагностические коэффициенты.

Анамнестические данные

1. Возраст матери:

- до 19 лет: +1 балл;
- 20–24 года: 0 баллов;
- 25–29 лет: +2 балла;
- 30 лет и более: +2 балла.

Возраст матери, особенно младше 19 или старше 30 лет, может быть фактором риска.

2. Семейное положение пациентки:

- замужем: 0 баллов.
- не замужем: +4 балла.

Незамужние женщины могут иметь повышенный риск ПЭ.

3. Образование:

- высшее: 0 баллов;
- незаконченное высшее: 0 баллов;
- среднее специальное: +1 балл;
- среднее (незаконченное среднее): +2 балла.

Низкий уровень образования может быть связан с повышенным риском ПЭ.

4. Срок взятия на учет по беременности:

- до 12 недель: 0 баллов;
- 13 до 22 недель: +1 балл;
- 22 и более недель: +12 баллов.

Позднее взятие на учет по беременности увеличивает риск ПЭ.

5. Паритет:

- первые роды: 0 баллов;
- вторые роды: +1 балл;
- третьи роды и более: +2 балла.

Последующие роды могут быть связаны с повышенным риском ПЭ.

6. Количество беременностей:

- первая: +1 балл;
- вторая: +2 балла;
- третья и более: +2 балла.

Многократные беременности могут увеличивать риск ПЭ.

7. Возраст начала половой жизни:

- до 17 лет: +4 балла;
- 18 лет и старше: -2 балла.

Раннее начало половой жизни может быть связано с повышенным риском инфекций.

8. АбORTы (медицинские или само-произвольные) в анамнезе:

- не было: 0 баллов;
- один: +3 балла;
- два и более: +7 баллов.

Наличие абортов в анамнезе увеличивает риск ПЭ.

9. Сопутствующие экстрагенитальные заболевания:

- без сопутствующих экстрагенитальных заболеваний: 0 баллов;
- болезни мочевыводящих путей: +4 балла;
- болезни системы кровообращения: +4 балла;
- болезни эндокринной системы: +6 балла;
- отягощенный аллергический анамнез: +6 баллов;
- заболевания органов дыхания: +2 балла;
- ОРВИ, грипп и другие инфекции во время беременности: +8 баллов;
- два и более сопутствующих экстрагенитальных заболеваний: +7 баллов.

Наличие хронических заболеваний, особенно аллергических и эндокринологических, а также ОРВИ, гриппа повышает риск ПЭ в послеродовом периоде.

10. Сопутствующие генитальные заболевания:

- нет сопутствующих генитальных заболеваний: 0 баллов;
- два и более заболеваний: +4 балла;
- патология шейки матки: +1 балл;
- воспалительные заболевания влагалища, вагинальный дисбиоз: +2 балла;
- миома матки: +1 балл.

Наличие генитальных заболеваний, особенно инфекционно-воспалительных, увеличивает риск ПЭ.

Течение беременности

1. Осложнения беременности:

- без осложнений: 0 баллов;
- два и более осложнений: +2 балла;
- угроза прерывания беременности: +1 балл;
 - гестационный пиелонефрит: +6 баллов;
 - вагинит или вагинальный дисбиоз: +2 балла;
 - анемия: +3 балла;
 - преэклампсия: +3 балла;
 - хроническая гипоксия плода: +10 баллов;
 - многоводие: +12 баллов;
 - признаки внутриутробного инфицирования (примеси в околоплодных водах) +10 баллов.

Осложнения беременности, особенно хроническая гипоксия плода, многоводие и внутриутробное инфицирование значительно повышают риск ПЭ.

2. Психосоматический статус:

– оптимальный тип психологического компонента гестационной доминанты (ОТПКГД): 0 баллов;
 – другие типы ПКГД: +1 балл.

Психологическое состояние матери может влиять на риск развития ПЭ.

3. Расположение плаценты:

– на передней стенке матки: +1 балл;
 – на задней стенке матки: +1 балл;
 – локализация плаценты в области дна матки: 0 баллов;
 – предлежание плаценты (низкая плацентация): +8 баллов.

Расположение плаценты может влиять на риск воспалительных процессов в матке. Максимальный риск ПЭ при предлежании плаценты.

4. Инвазивные диагностические манипуляции (амниоцентез, хорион- и плацентобиопсия, кордоцентез) или оперативные вмешательства (аппендэктомия и т. д.) во время беременности:

– диагностические манипуляции: +12 баллов;
 – оперативные вмешательства: +10 баллов.

Инвазивные диагностические манипуляции значительно увеличивают риск ПЭ.

Течение родов**1. Срок родов:**

– преждевременные: +12 баллов;
 – срочные: 0 баллов;
 – запоздалые: +12 баллов.

Преждевременные и запоздалые роды значительно повышают риск ПЭ.

2. Осложнения во время родов:

– без осложнений: 0 баллов;

– два и более осложнений: +8 баллов;

– аномалии родовой деятельности: +6 баллов;

– острые гипоксия плода: +4 балла;
 – индуцированные роды: +6 баллов;
 – хорионамнионит (эндометрит) в родах: +12 баллов.

Эти признаки указывают на то, что осложнения во время родов, особенно множественные, значительно увеличивают риск развития ПЭ.

3. Кратность влагалищных исследований во время родов:

– 4 и более: +12 баллов;
 – 3 и менее: +1 балл.

Частые влагалищные исследования во время родов могут способствовать инфицированию и повышать риск ПЭ.

4. Длительность безводного периода:

– менее 6 часов: +2 балла;
 – 6 и более часов: +5 баллов;
 – более 12 часов: +8 баллов.

Длительный безводный период увеличивает риск инфицирования матки.

5. Гипертермия в родах:

– до 37,5: +2 балла;
 – выше 37,5: +4 балла.

Гипертермия в родах повышает риск развития ПЭ.

6. Характер околоплодных вод:

– светлые: 0 баллов;
 – воды с меконием: +6 баллов;
 – воды с меконием и неприятным запахом: +10 баллов.

Отхождение вод с меконием и наличием неприятного запаха связано с высоким риском ПЭ.

7. Повреждения мягких родовых путей:

- без повреждений: +0 баллов;
- разрыв шейки матки +8 баллов;
- разрыв стенок влагалища: +1 балл;
- разрыв промежности: +8 баллов;
- множественная травма мягких родовых путей: +10 баллов.

Травмы родовых путей, особенно разрыв шейки матки 2-3 степени и множественные травмы родового канала, значительно повышают риск ПЭ.

8. Продолжительность родов:

- быстрые: +8 баллов;
- стремительные: +12 баллов;
- затяжные: +12 баллов;
- нормальные: +1 балл.

Как стремительные, так и затяжные роды увеличивают риск развития ПЭ.

9. Оперативные вмешательства во время родов и раннем послеродовом периоде:

- без вмешательства: 0 баллов;
- ручное или инструментальное обследование полости матки: +12 баллов;
- кесарево сечение по экстренным показаниям: +10 баллов;
- подготовка к родам (индукция) с помощью катетера Фолея: +10 баллов.

Оперативные вмешательства, особенно ручное обследование полости матки, значительно повышают риск ПЭ.

10. Объем кровопотери во время родов:

- до 0,5% массы тела: +1 балл;
- более 0,5% массы тела: +3 балла;
- массивная кровопотеря (более 1 л): +6 баллов.

Патологическая (более 0,5% от массы тела) кровопотеря увеличивает риск ПЭ.

11. Площадь поверхности плаценты:

- до 359 см²: +2 балла;
- от 360 до 389 см²: +3 балла;
- 390 и более см²: +6 баллов.

Увеличенная площадь плаценты может быть связана с повышенным риском воспалительных процессов.

12. Характеристика плода: масса, количество:

- до 2999 г: +1 балл;
- 3000 г до 3999 г: +1 балл;
- 4000 г и больше: +4 балла;
- многоплодная беременность: +12 баллов.

Крупный плод и многоплодная беременность повышают риск ПЭ.

Течение послеродового периода

1. Расширение полости матки (ложиометра) по данным УЗИ на 3-и и 4-е сутки после родов:

- до 8 мм: +9 баллов;
- 9 и более мм: +9 баллов;
- остатки плацентарной ткани: +14 баллов.

Расширение полости матки после родов может указывать на задержку ложий и повышать риск развития ПЭ, остатки плацентарной ткани значительно увеличивают риск ПЭ.

2. Уровень гемоглобина (послеродовая анемия):

- 89 и менее г/л: +12 баллов;
- от 90 до 99 г/л: +6 баллов;
- от 100 до 109 г/л: +4 балла;
- 110 и выше г/л: +1 балл.

Анемия после родов является значительным фактором риска ПЭ.

3. Заболевания новорожденных воспалительного генеза:

- да: +5 баллов;
- нет: 0 баллов.

Заболевания новорожденных воспалительного генеза могут указывать на инфекционные процессы у матери.

4. Совместное пребывание матери и ребенка после родов:

- да: 0 баллов;
- нет: +6 баллов.

Отсутствие совместного пребывания может быть связано с осложнениями у матери.

5. Изменение количества лейкоцитов в периферической крови:

- отсутствие лейкоцитоза: 0 баллов;
- лейкоцитоз до $10 \cdot 10^9/\text{л}$: + 4 балла;
- лейкоцитоз до $15 \cdot 10^9/\text{л}$: + 8 баллов;
- лейкоцитоз выше $20 \cdot 10^9/\text{л}$: + 10 баллов.

Выраженный лейкоцитоз или лейкопения свидетельствуют о высоком риске ПЭ.

6. Субинволюция матки после родов:

- отсутствие субинволюции: +1 балл;
- наличие субинволюции: +9 баллов.

Субинволюция матки свидетельствует о высоком риске развития ПЭ.

Диагностические коэффициенты оцениваются в динамике: сначала во время беременности, затем к ним добавляются коэффициенты факторов, оцениваемых во время родов, и далее – в

послеродовом периоде. Таким образом, риск ПЭ может как возрастать, так и снижаться.

Сумма диагностических коэффициентов позволяет оценить риск развития ПЭ:

- сумма до +9 баллов: отсутствие риска (ω_0);
- сумма от +10 до +14 баллов: низкий риск ($\omega_{\text{нр}}$);
- сумма от +15 до +19 баллов: средний риск ($\omega_{\text{ср}}$);
- сумма +20 и более баллов: высокий риск ($\omega_{\text{вр}}$).

Эти данные могут быть интегрированы в систему поддержки принятия решений для автоматической оценки риска ПЭ у каждой пациентки на основе введенных данных.

Результаты и их обсуждение

Для эффективной работы системы поддержки принятия решений необходимо выполнить интеграцию данных из различных источников, таких как электронные медицинские карты, результаты лабораторных и инструментальных исследований, а также информацию о факторах риска. Назначение разработанной системы заключается в проведении анализа полученных данных в реальном времени и предоставлении врачу актуальных рекомендаций. Например, при поступлении новой информации о состоянии пациентки (например, результаты анализа крови или УЗИ) система должна автоматически обновлять получившиеся рекомендации.

На первом этапе проектирования СППР экспертной системы прогнозирования риска возникновения ПЭ было определено ее место и роль в

клиническом процессе – в первом приближении представлено информационно-аналитической моделью (рис. 1).

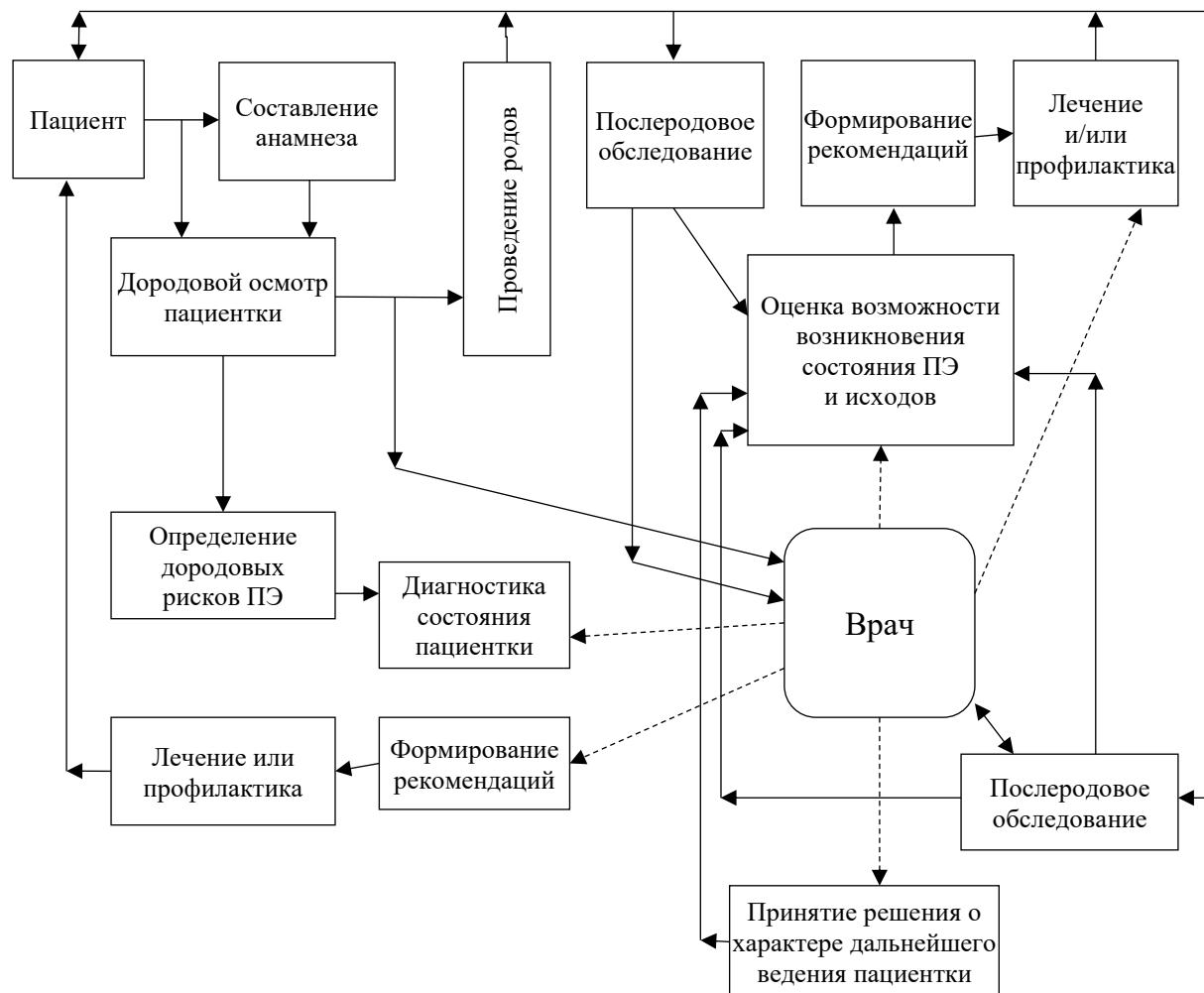


Fig. 1. Information and analytical model of the clinical process:
 ——— — information flows; - - - - - doctor's actions [15]

Таким образом, формируя и анализируя анамнез и оценивая численные значения рисков ПЭ, по решающим правилам осуществляется прогнозирование различных форм ПЭ (ω_0 – отсутствие риска ПЭ; $\omega_{1\text{np}}$ – низкий риск; $\omega_{2\text{cp}}$ – средний риск; $\omega_{3\text{вр}}$ – высокий риск) [16].

После проведения терапевтических или профилактических мероприятий обязательно осуществляется контроль текущего состояния больной и прогнозируется риск возникновения ПЭ (и исходов протекания заболевания).

Архитектура программного обеспечения СППР (ЭС выделена штрихпунктирной линией) построена по классическому принципу и представлена ниже (рис. 2).

ЭС функционирует в трех режимах:

1) обучение (формирование базы знаний специалистами когнитологами);

2) формирование прогностического диагностического заключения о риске возникновения и развития ПЭ для лечащего врача;

3) импортирование информации о состоянии пациента (выполняется медицинским работником – врачом, медсестрой, врачом-статистиком).

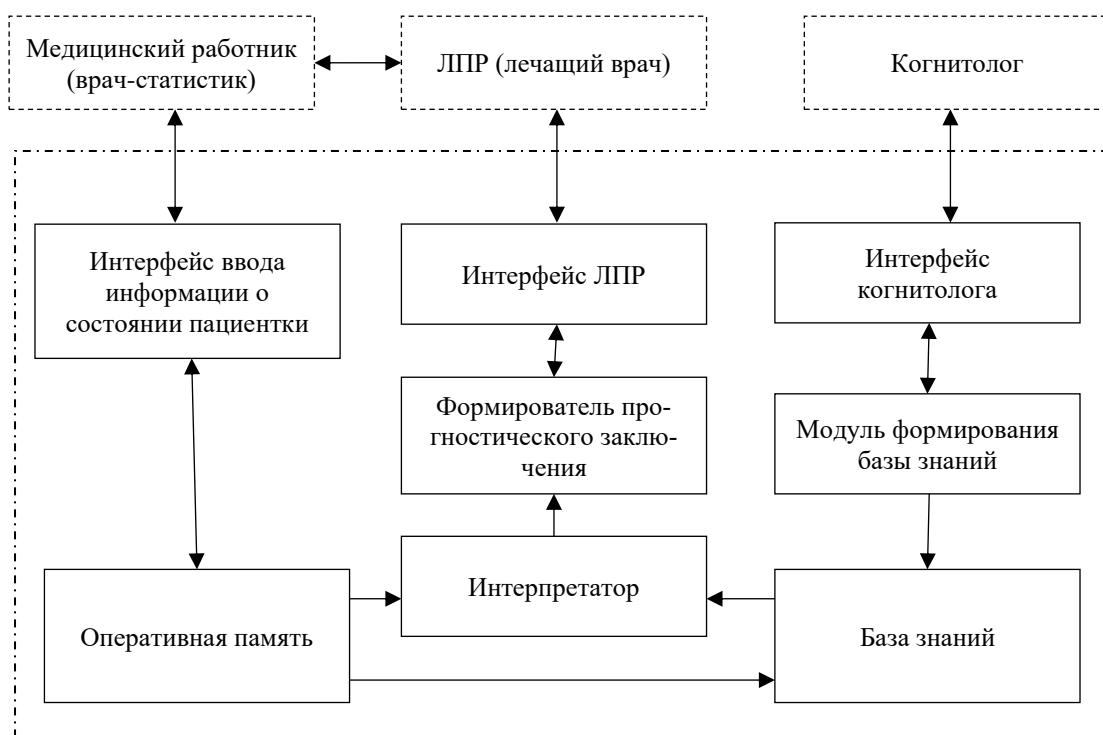


Рис. 2. Архитектура программного обеспечения экспертной системы

Fig. 2. Software architecture of the expert system

В *оперативной памяти* ЭС осуществляется временное или постоянное (на усмотрение ЛПР) хранение информации, вводимой врачом (или иным медицинским работником) о состоянии больной. Эта информация формируется в процессах обследования и анализа анамнеза (включая «паспортные» данные). Из блока «Оперативная память» информация поступает в блок «База

знаний», если она применяется в дальнейшем для коррекции производных решающих правил (например, для изменения значений коэффициентов уверенности), или «*Интерпретатор*». В блоке «*Интерпретатор*» осуществляется соотнесение анализируемого состояния больной к одному из альтернативных кластеров: отсутствие риска, низкий риск, средний риск, высокий риск.

Анализируя значения коэффициентов уверенности, блок «Интерпретатор» упорядочивает идентифицированные кластеры по мере убывания коэффициентов и передает сформированный кортеж в блок «Формирования прогностического заключения».

Блок «Формирователь прогностического заключения» создает итоговое заключение о риске возникновения и вида исходов для лечащего врача, которое передается ему (в стандартизованном определенном виде) посредством инструментов «Интерфейса ЛПР». Предиктивное итоговое включение формируется в виде

<информация о пациенте > (паспортная часть)

1. ЕСЛИ

$$\left(\text{Risk}_{\omega_{\text{bp}}} \right) > \text{por}) \& (\text{Risk}_{\omega_{\text{bp}}} \geq \left(1 - \prod_{\text{cp}=1, l \neq \text{cp}}^L (1 - \text{Risk}_{\omega_{\text{cp}}}) \right) \& (\sum_{\text{cp}=1, l \neq \text{cp}}^L (\text{U}_{\omega_{\text{cp}}}) \neq 0)),$$

ТО прогнозируется ПЭ типа фвр с уверенностью $\text{U}_{\omega_{\text{bp}}}$.

Посредством блок «Модуль формирования базы знаний» вводятся: номера кластеров i ($0, 1, 2, 3$); пороговые значения риска соотнесения к кластеру – por_i ($0, 1, 2, 3$); коэффициенты уверенности $\text{U}_{\omega_{\text{cp}}}$ (определяются когнитологом на этапе обучения ЭС) и значения $\text{Risk}_{\omega_{\text{bp}}}$. Значения $\text{Risk}_{\omega_{\text{bp}}}$ определяются блоком «Интерпретатор» (табл. 1). Полученные значения показателей были уточнены на дополнительной выборке AnamFact клинически подтвержденного материала [2].

ПРОГНОЗ ПЭ

<источник информации> (данные анализа обследования или изучения анамнеза)

<риск> <коэффициент уверенности в прогнозе>

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ

<выздоровление> <коэффициент уверенности в прогнозе>

<летальный исход> <коэффициент уверенности в прогнозе>

В блоке «База знаний» разработанной экспертной системы применяются следующие структуры производственных решающие правил (получены на обучавших репрезентативных выборках) [1].

Семантический смысл данного решающего правила следующий: состояние пациента относится к тому кластеру заболеваний (ω_i , $i = 0, 1, 2, 3$), для которого выполняются условия: значение коэффициента уверенности должно быть больше нуля ($\text{U}_i > 0$, $i = 0, 1, 2, 3$), вычисленные величины рисков превышают заданные пороговые значения (por_i , $i = 0, 1, 2, 3$), но при этом оказываются больше значения риска не соотнесения к остальным альтернативным вариантам кластеров ПЭ.

Таблица 1. Значения рисков и коэффициентов уверенности для выборки AnamFact**Table 1.** Risk values and confidence coefficients for the AnamFact sample

Кластер i	Риски	Коэффициенты уверенности
ω_0	AnamRisk(w_0 , an) = 0,88	$U_{\omega_0} = 0,97$
$\omega_1_{\text{нр}}$	AnamRisk($w_{\text{нр}}$, an) = 0,91	$U_{\omega_1_{\text{нр}}} = 0,93$
$\omega_2_{\text{ср}}$	AnamRisk($w_{\text{ср}}$, an) = 0,95	$U_{\omega_2_{\text{ср}}} = 0,96$
$\omega_3_{\text{вр}}$	AnamRisk($w_{\text{вр}}$, an) = 0,81	$U_{\omega_3_{\text{вр}}} = 0,92$

2. Если $\text{Risk } \omega_{\text{вр}} \geq \text{Risk } \omega_{\text{нр}}$,

ТО у больной возможен летальный исход с уверенностью $U_{\omega_{\text{вр}}}$,

ИНАЧЕ – прогнозируется выздоровление больной с уверенностью $U_{\omega_{\text{нр}}}$.

Параметры структуры Risk $\omega_{\text{вр}}$, Risk $\omega_{\text{нр}}$ и значения коэффициентов уверенности $U_{\omega_{\text{нр}}}$ и $U_{\omega_{\text{вр}}}$ определяются когнитологом на этапе обучения экспертной системы на дополнительной экзаменационной выборке.

Для признаков, полученных по результатам обследования пациента, применяется продукционное правило следующей конструкции:

3. ЕСЛИ ($\text{Fin}(\{\text{ХО}\})_{\text{вр}}$),

ТО состояние больной соотносится к кластеру ПЭ с уверенностью $\omega_{\text{вр}}$ с уверенностью $U_{\omega_{\text{вр}}}(\{\text{Osmt}\})$.

Численные значения $U_{\omega_{\text{вр}}}(\{\text{Osmt}\})$ импортируются когнитологом в систему на этапе обучения.

Формулы $\text{Fin}(\{\text{ХО}\})_{\text{вр}}$ представляют собой логические функции в дизъюнктивной нормальной форме и импортируются в виде текстовой строки (польская инверсная запись) «Интерпретатор».

Блок «Формирование базы знаний» настраивает или адаптирует параметры правил в блоке «Базе знаний» соотнесением вводимых когнитологом параметров к определенным структурам альтернативных кластеров.

Работа экспертной системы инициализируется запуском HTML-файла. Затем в режиме дружественного интерфейса заполняются определенные формы путем ввода с клавиатуры значений или «флажка» присутствия/отсутствия определенных признаков (факторов риска) у больной.

Интерфейс ввода информации о состоянии больной включает две части – «Паспортную» и «Анамнестическую». «Паспортная часть» включает в себя: фамилию, имя, отчество, пол, дату рождения, номер медицинской карты, диагноз при поступлении, вид операции, дату поступления (формируется автоматически). «Анамнестическая часть» состоит из двух информационных блоков: анкета-опросник (по результатам анализа анамнеза) и присутствие/отсутствие определенного признака. При необходимости в процессе диалога с ЭС

пользователем осуществляется коррекция информации.

Интерфейс пользователя предназначен для работы ЭС с медицинским работником (врачом): формируется заключение о возможности возникновения или риска развития ПЭ и вариантов исхода (выздоровление или смерть) [10]. Оценивается и указывается уверенность в прогнозе. Врач, сравнивая альтернативные предложения, наблюдая за пациентом и на основание собственного опыта, принимает решение об определенной терапевтической или профилактической процедуре [11].

Обратная связь с системой реализуется «запросами» врача о различных вариантах формирования итогового заключения. Предусмотрен режим коррекции введенной ранее информации о состоянии пациента в блоке «Интерфейсе ввода информации о пациенте» [17]. При использовании ЭС в режиме обучения или «проигрывание возможных ситуаций» с помощью ЭС рассматриваются различные варианты развития ситуации в послеоперационный период¹.

Блок «Интерфейс когнитолога» реализуется «Модуль формирования базы знаний» путем постепенного насыщения

базы знаний ЭС (БЗ) решающими диагностическими правилами производственного типа [18]. Режимы работы когнитолога с ЭС позволяют осуществлять коррекцию введенных параметров правила, добавление и удаление правил [19], [20].

Выводы

Применение полученных диагностических решающих правил на клинически репрезентативном материале показало диагностическую эффективность $0,96 \pm 0,02$. Разработанная ЭС может эффективно применяться в клинических условиях. Также возможно использование данной ЭС в учебном процессе при подготовке медицинских работников.

Учет факторов риска, интеграция данных из различных источников, использование прогностических моделей и формирование индивидуальных рекомендаций по лечению и профилактике – все это ключевые аспекты, которые должны быть учтены при разработке такой системы. Внедрение подобной системы в клиническую практику может значительно улучшить качество диагностики и лечения послеродового эндометрия, снизить риск осложнений и улучшить исходы для пациенток.

¹ Серёгин С. П. Пути повышения эффективности патогенетически обоснованного лечения хронического простатита: дис. ... д-ра

мед. наук / Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова. СПб., 1997.

Список литературы

1. Неретин А. А., Петровский С. А. Медицинские экспертные системы поддержки принятия решений для клинических синдромов // Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего: сборник материалов IX Международной научно-практической конференции, 28 ноября 2018 г. Кемерово: ЗапСибНЦ, 2018. Т. 2. С. 106–108.
2. Dobrovolsky I. I., Artemenko M. V., Marentsov M. V. Features of synthesis of decisive rules for medical a smart of expert systems // Медико-экологические информационные технологии: сборник научных статей по материалам XXII Международной научно-технической конференции / под редакцией Н. А. Кореневского; Юго-Западный государственный университет. Курск, 2019. С. 63–71.
3. Создание математических моделей при помощи многомерного регрессионного анализа по скринингу диабетической ретинопатии / Т. И Якунченко, С. П. Серегин, Л. В. Шульга, О. А. Кныш, Г. В. Сиплиый, Д. Р. Шмарова // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2024. Т. 23, № 4. С. 200–205. <https://doi.org/10.36622/1682-6523.2024.23.4.025>
4. Совершенствование диагностики острого эндометрита на основе моделирования и кластерного анализа параметров местного иммунитета / Н. М. Агарков, О. В. Головченко, В. В. Аксёнов [и др.] // Клиническая лабораторная диагностика. 2018. Т. 63, № 4. С. 239–242. <https://doi.org/10.18821/0869-2084-2018-63-4-239-242>
5. Аксёнов В. В. Диагностика и классификация больных острым эндометритом на основе дискриминантного анализа и информативных диагностических симптомов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. № 4(17). С. 93–98.
6. Рационализация дифференциальной диагностики рака яичников и хронического сальпингоофорита по параметрам дезинтеграции и сетевого моделирования изменений кровотока в маточных и яичниковых артериях и венах / Н. М. Агарков, П. В. Ткаченко, В. В. Аксёнов [и др.] // Вопросы онкологии. 2017. Т. 63, № 5. С. 766–769. <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2017-63-5-766-769>
7. Использование метода проточной цитометрии и диагностически значимых показателей системного клеточного иммунитета для диагностики острого эндометрита / Н. М. Агарков, К. Ф. Макконен, В. В. Аксёнов [и др.] // Клиническая лабораторная диагностика. 2017. Т. 62, № 9. С. 563–567. <https://doi.org/10.18821/0869-2084-2017-62-9-563-567>

8. Рационализация лабораторной диагностики острого сальпингофорита по информативным параметрам гуморального иммунитета / Н. М. Агарков, В. Н. Агаркова, В. В. Аксёнов [и др.] // Клиническая лабораторная диагностика. 2017. Т. 62, № 11. С. 690–693. <https://doi.org/10.18821/0869-2084-2017-62-11-690-693>

9. Оценка функционального состояния и состояния здоровья человека с использованием теории измерения латентных переменных на основе моделей Г. Раша / А. Н. Шуткин, Е. А. Бойцова, С. Н. Кореневская, В. Я. Провоторов // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2014. Т. 13, № 4. С. 927–932. doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-102-121

10. Гибридные нечеткие модели оценки функционального состояния и состояния здоровья человека-оператора информационно-насыщенных систем / Н. А. Кореневский, С. Н. Родионова, И. И. Хрипина, М. А. Мясоедова // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 2. С. 105–116. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.18.2.017>

11. Прогнозирование появления и развития гангрены нижних конечностей с использованием нечетких интеллектуальных технологий: монография / А. В. Быков, С. Н. Родионова, С. А. Пархоменко, Л. В. Стародубцева, И. И. Хрипина. Курск: Издательский дом ВИП, 2017. 420 с.

12. Developing a biotech scheme using fuzzy logic model to predict occurrence of diseases using person's functional state / R. T. Al-Kasasbeh, N. A. Korenevskiy, A. A. Aikeyeva, A. A. Shaqadan, I. Maksim, S. N. Rodionova // International Journal of Computer Applications in Technology. 2020. Vol. 62, N 3. P. 257–267. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2020.106570>

13. Кореневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечётких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.

14. Экспертная система оценки риска возникновения и развития тромбоэмболизма / М. В. Артеменко, В. И. Федягин, А. Н. Шуткин, Г. А. Квашнина // Интегративные тенденции в медицине и образовании. 2024. Т. 4. С. 9–16.

15. Метод комплексной оценки уровня информативности классификационных признаков в условиях нечеткой структуры данных / Н. А. Кореневский, В. В. Аксёнов, С. Н. Родионова, С. Н. Гонтарев, Л. П. Лазурина, Р. И. Сафонов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 3. С. 80–96. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-80-96>

16. Синтез моделей прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний на основе гибридной нечеткой технологии / Р. И. Сафонов, К. В. Разумова, А. Ю. Рыбаков, А. В. Лях // Известия Юго-Западного государственного университета.

Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 3. С. 102–121. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-102-121>

17. Антиоксидантный статус и состояние местного иммунитета у больных хроническим простатитом / А. В. Новиков, С. П. Серегин, С. Г. Шестаков, М. Н. Шатохин // Человек и его здоровье. 2001. № 2. С. 50–53.

18. Fuzzy models of choice of prevention schemes for the occurrence and development of gangrene of the lower extremities / N. A. Korenevskiy, A. V. Bykov, R. T. Al-Kasasbeh, M. S. Alshamasin, S. N. Rodionova, I. Maksim, S. A. Parkhomenko, M. M. Al-Smadi, M. Al-Jundi, A. A. Aikeyeva // Critical Reviews in Biomedical Engineering. 2021. Vol. 49, N 5. P. 1–12. <https://doi.org/10.1615/CritRevBiomedEng.2022038502>

19. Оценка защитных функций организма и его систем по показателям функционального состояния и функционального резерва / Н. А. Кореневский, С. Н. Родионова, К. В. Разумова, О. Ю. Лукаш // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2023. Т. 22, № 3. С. 67–77. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.22.3.009>

20. Прогнозирование и ранняя диагностика бронхиальной астмы у работников, специализирующихся на аргонной сварке на основе нечетких математических моделей / И. Ю. Григоров, Л. В. Стародубцева, С. П. Серегин, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 170–183. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-170-183>

References

1. Neretin A.A., Petrovsky S.A. Medical expert decision support systems for clinical syndromes. In: *Nauchno-tehnicheskii progress: aktual'nye i perspektivnye napravleniya budushche-go: sbornik materialov IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, 28 noyabrya 2018 g. = *Scientific and technological progress: current and promising areas of the future: Collection of materials of the IX International Scientific and Practical Conference, 28 November 2018*. Vol. 2. Kemerovo: ZapSibNTs; 2018. P. 106–108. (In Russ.)
2. Dobrovolsky I.I., Artemenko M.V., Marentsov M.V. Features of synthesis of decisive rules for medical a smart of expert systems. In: Korenevsky N.A. (ed.). *Mediko-ekologicheskie informatsionnye tekhnologii: sbornik nauchnykh statei po materialam XKhII Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii* = *Medical and environmental information technologies: collection of scientific articles on the materials of the XXII International Scientific and Technical Conference*. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2019. P. 63–71. (In Russ.)

3. Yakunchenko T.I., Seregin S.P., Shulga L.V., Knysh O.A., Siplivy G.V., Shmarova D.R. Creation of mathematical models using multidimensional regression analysis for diabetic retinopathy screening. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2024;23(4):200–205. (In Russ.) <https://doi.org/10.36622/1682-6523.2024.23.4.025>
4. Agarkov N.M., Golovchenko O.V., Aksenov V.V., et al. Improving the diagnosis of acute endometritis based on modeling and cluster analysis of local immunity parameters. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika = Clinical Laboratory Diagnostics*. 2018;63(4):239–242. <https://doi.org/10.18821/0869-2084-2018-63-4-239-242>
5. Aksenov V.V. Diagnosis and classification of patients with acute endometritis based on discriminant analysis and informative diagnostic symptoms. *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*. 2015;4(17):93–98. (In Russ.)
6. Agarkov N.M., Tkachenko P.V., Aksenov V.V., et al. Rationalization of the differential diagnosis of ovarian cancer and chronic salpingoophoritis according to the parameters of disintegration and network modeling of changes in blood flow in the uterine and ovarian arteries and veins. *Voprosy onkologii = Issues of Oncology*. 2017; 63(5):766–769. (In Russ.) <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2017-63-5-766-769>
7. Agarkov N.M., Makkonen K.F., Aksenov V.V., et al. The use of flow cytometry and diagnostically significant indicators of systemic cellular immunity for the diagnosis of acute endometritis. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika = Clinical Laboratory Diagnostics*. 2017;62(9):563–567. (In Russ.) <https://doi.org/10.18821/0869-2084-2017-62-9-563-567>
8. Agarkov N.M., Agarkova V.N., Aksenov V.V., et al. Rationalization of laboratory diagnostics of acute salpingoophoritis according to informative parameters of humoral immunity. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika = Clinical Laboratory Diagnostics*. 2017;62(11):690–693. (In Russ.) <https://doi.org/10.18821/0869-2084-2017-62-11-690-693>
9. Shutkin A.N., Boitsova E.A., Korenevskaya S.N., Provotorov V.Ya. Assessment of the functional state and state of human health using the theory of measurement of latent variables based on G. Rush models. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*. 2014;13(4):927–932. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-102-121>
10. Konenevsky N.A., Rodionova S.N., Khripina I.I., Myasoedova M.A. Hybrid fuzzy models for assessing the functional state and health of a human operator of information-rich systems. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = Systems Analysis and*

11. Bykov A.V., Rodionova S. N., Parkhomenko S. A., Starodubtseva L. V., Khrripina I.I. Forecasting the appearance and development of gangrene of the lower extremities using fuzzy intelligent technologies. Kursk: Izdatel'skii dom VIP; 2017. 420 c. (In Russ.)
12. Al-Kasasbeh R.T., Korenevsky N.A., Aikeyeva A.A., Shaqadan A.A., Maksim I., Rodionova S.N. Developing a biotech scheme using fuzzy logic model to predict the occurrence of diseases using a person's functional state. *International Journal of Computer Applications in Technology.* 2020;62(3):257–267. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2020.106570>
13. Korenevsky N.A., Rodionova S.N., Khrripina I.I. Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems. Stary Oskol: TNT; 2019. 472 p. (In Russ.)
14. Artemenko M.V., Fedyanin V.I., Shutkin A.N., Kvashnina G.A. Expert system for assessing the risk of occurrence and development of thromboembolism. *Integrativnye tendentsii v meditsine i obrazovanii = Integrative Trends in Medicine and Education.* 2024;4:9–16. (In Russ.)
15. Korenevsky N.A., Aksyonov V.V., Rodionova S.N., Gontarev S.N., Lazurina L.P., Safronov R.I. A method of complex assessment of the level of informativeness of classification features in conditions of a fuzzy data structure. *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(3):80–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-80-96>
16. Safronov R.I., Razumova K.V., Rybakov A.Yu., Lyakh A.V. Synthesis of models for forecasting and diagnosing occupational diseases based on hybrid fuzzy technology. *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.* 2023;13(3):102–121. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-3-102-121>
17. Novikov A.V., Seregin S.P., Shestakov S.G., Shatokhin M.N. Antioxidant status and the state of local immunity in patients with chronic prostatitis. *Chelovek i ego zdorov'e = Man and His Health.* 2001;(2):50–53. (In Russ.)
18. Korenevskiy N.A., Bykov A.V., Al-Kasasbeh R.T., Alshamasin M.S., Rodionova S.N., Maksim I., Parkhomenko S.A., Al-Smadi M.M., Al-Jundi M., Aikeyeva A.A. Fuzzy models of choice of prevention schemes for the occurrence and development of gangrene of the lower extremities. *Critical Reviews in Biomedical Engineering.* 2021;49(5):1–12. <https://doi.org/10.1615/CritRevBiomedEng.2022038502>

19. Korenevsky N. A., Rodionova S. N., Razumova K. V., Lukash O. Yu. Assessment of the protective functions of the body and its systems by indicators of functional state and functional reserve. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems.* 2023;22(3):67–77. (In Russ.) <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.22.3.009>
20. Grigorov I.Y., Starodubtseva L.V., Seregin S.P., Shulga L.V. Forecasting and early diagnosis of bronchial asthma in workers specializing in argon welding based on fuzzy mathematical models. *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.* 2023;13(2):170–183. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-170-183>

Информация об авторах / Information about the Authors

Аксёнов Виталий Вячеславович,
заведующий лабораториями кафедры
биомедицинской инженерии, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru,
ORCID: 0000-0002-6516-1871

Vitaliy V. Aksenov, Head of Laboratories
of the Department of Biomedical Engineering,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru,
ORCID: 0000-0002-6516-1871

Серегин Станислав Петрович, доктор
медицинских наук, профессор, заведующий
кафедрой биомедицинской инженерии,
Юго-Западный государственный университет,
e-mail: seregin.stanislaw2011@yandex.ru,
ORCID: 0000-0001-9001-8420

Stanislav P. Seregin, Doctor of Sciences
(Medical), Professor, Head of the Department
of Biomedical Engineering, Southwest State
University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: seregin.stanislaw2011@yandex.ru,
ORCID: 0000-0001-9001-8420

Громыко Светлана Александровна,
студентка кафедры биомедицинской
инженерии, Юго-Западный государственный
университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: gromyko2010@list.ru,
ORCID: 0000-0002-2451-4503

Svetlana A. Gromyko, Student of the Department
of Biomedical Engineering, Southwest State
University, Kursk, Russian Federation,
e-mail gromyko2010@list.ru,
ORCID: 0000-0002-2451-4503

Петров Сергей Вячеславович, кандидат
медицинских наук, врач – акушер-гинеколог,
руководитель, Клинический медицинский
центр «Доктор Петров»,
e-mail reception@docpetrov46.ru,
ORCID: 0000-0002-8709-5887

Sergey V. Petrov, Candidate of Sciences
(Medical), Obstetrician-Gynecologist,
Head, Dr. Petrov Clinical Medical Center,
e-mail reception@docpetrov46.ru,
ORCID: 0000-0002-8709-5887

Хардиков Александр Владимирович,
доктор медицинских наук, врач – акушер-
гинеколог, доцент кафедры акушерства
и гинекологии, Клинический медицинский
центр «Доктор Петров», Курский
государственный медицинский университет
Министерства здравоохранения Российской
Федерации, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: Hardikov@docpetrov46.ru,
ORCID: 0000-0002-7394-4622

Петрова Арина Сергеевна, студент,
Курский государственный медицинский
университет Министерства здравоохранения
Российской Федерации, г. Курск,
Российская Федерация,
e-mail: petrova2022@list.ru

Aleksandr V. Khardikov, Doctor of Sciences
(Medical), Obstetrician-Gynecologist, Associate
Professor of the Department of Obstetrics
and Gynecology, Dr. Petrov Clinical Medical
Center, Kursk State Medical University
of the Ministry of Health of the Russian
Federation, Kursk, Russian Federation,
e-mail: Hardikov@docpetrov46.ru,
ORCID: 0000-0002-7394-4622

Arina S. Petrova, Student, Kursk State Medical
University of the Ministry of Health of the Russian
Federation, Kursk, Russian Federation,
e-mail: petrova2022@list.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-201-215>

УДК 004.451

TB-SEIRZ-Q: моделирование эпидемиологии туберкулеза в России с множественной лекарственной устойчивостью и карантином

О. В. Корчевская¹✉

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
пр-т им. газ. «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск 660037, Российская Федерация

✉ e-mail: okfait@gmail.com

Резюме

Цель исследования – разработка и системный анализ комплексной математической модели эпидемиологии туберкулеза в России, учитывающей множественную лекарственную устойчивость (МЛУ-ТБ) и карантинные меры, для формализации динамики инфекции и информационной поддержки управлеченческих решений.

Методы. Использована методология системного анализа. Разработана детерминированная математическая модель (TB-SEIRZ-Q), описываемая системой нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Модель расширяет классические подходы за счет введения латентной стадии, стратификации инфицированных по чувствительности к лечению и бактериовыделению, а также раздельных карантинных групп. Проведен анализ устойчивости модели, вычислено базовое репродуктивное число (R_0) методом следующего поколения. Параметры идентифицированы на основе официальных данных по России. Выполнены численное моделирование динамики эпидемии и анализ чувствительности ключевых параметров.

Результаты. Получена модель TB-SEIRZ-Q, адекватно описывающая специфику ТБ. Расчетное базовое репродуктивное число $R_0 \approx 2,258$, что указывает на неустойчивость состояния без болезни и переход системы к эндемическому равновесию. Результаты численного моделирования демонстрируют высокое соответствие реальным данным заболеваемости ТБ в России за 2018–2023 гг. ($R^2 = 0,92$). Анализ чувствительности выявил ключевую роль скоростей передачи инфекции и изоляции в величине R_0 . Увеличение эффективности изоляции до 0,5 снижает R_0 ниже 1 (до 0,95), обеспечивая возможность ликвидации эпидемии.

Заключение. Разработанная модель TB-SEIRZ-Q является эффективным инструментом системного анализа эпидемии туберкулеза в России. Она обеспечивает формализацию динамики инфекции с учетом МЛУ-ТБ и карантинных мер, а также информационную основу для оценки и оптимизации стратегий управления эпидемией. Модель позволяет прогнозировать развитие ситуации и количественно оценивать влияние различных вмешательств, таких как усиление карантинных мер.

Ключевые слова: математическое моделирование; системный анализ; управление эпидемиологическими системами; обработка информации; динамика популяции; эпидемиология; туберкулез; лекарственная устойчивость; карантин; модель SEIRZ-Q.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Для цитирования: Корчевская О. В. TB-SEIRZ-Q: моделирование эпидемиологии туберкулеза в России с множественной лекарственной устойчивостью и карантином // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 3. С. 201–215. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-201-215>

Поступила в редакцию 11.07.2025

Подписана в печать 09.08.2025

Опубликована 30.09.2025

TB-SEIRZ-Q: Modeling the epidemiology tuberculosis in Russia with multidrug resistance and quarantine

Oksana V. Korchevskaya¹✉

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31 Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk 660037, Russian Federation

✉ e-mail: okfait@gmail.com

Abstract

The purpose of the research is to develop and systematically analyze a comprehensive mathematical model of tuberculosis epidemiology in Russia, taking into account multidrug resistance (MDR-TB) and quarantine measures, to formalize the dynamics of infection and provide information support for management decisions.

Methods. The methodology of systems analysis was used. A deterministic mathematical model (TB-SEIRZ-Q) described by a system of nonlinear ordinary differential equations was developed. The model expands classical approaches by introducing a latent stage, stratification of infected people by sensitivity to treatment and bacterial excretion, as well as separate quarantine groups. An analysis of the stability of the model was carried out, the basic reproductive number (R_0) was calculated using the next-generation method. The parameters were identified based on official data for Russia. Numerical modeling of the epidemic dynamics and sensitivity analysis of key parameters were performed.

Results. The TB-SEIRZ-Q model was obtained that adequately describes the specifics of TB. The estimated basic reproduction number $R_0 \approx 2,258$, indicating instability of the disease-free state and the transition of the system to endemic equilibrium. The results of numerical modeling demonstrate high correspondence to the real data on TB incidence in Russia for 2018-2023 ($R^2 = 0,92$). Sensitivity analysis revealed the key role of infection transmission and isolation rates in the R_0 value. Increasing the isolation efficiency to 0,5 reduces R_0 below 1 (to 0,95), providing the possibility of eliminating the epidemic.

Conclusion. The developed TB-SEIRZ-Q model is an effective tool for systemic analysis of the tuberculosis epidemic in Russia. It formalizes the infection dynamics taking into account MDR-TB and quarantine measures, as well as an information basis for assessing and optimizing epidemic management strategies. The model allows predicting the development of the situation and quantifying the impact of various interventions, such as strengthening quarantine measures.

Keywords: mathematical modeling; systems analysis; epidemiological systems management; information processing; population dynamics; epidemiology; tuberculosis; drug resistance; quarantine; SEIRZ-Q model.

Conflict of interest: The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

For citation: Korchevskaya O.V. TB-SEIRZ-Q: Modeling the epidemiology tuberculosis in Russia with multidrug resistance and quarantine. *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(3):201–215. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-201-215>

Received 11.07.2025

Accepted 09.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

Системный анализ эпидемиологических процессов туберкулеза (ТБ), особенно его множественная лекарственная устойчивость (МЛУ-ТБ), требует разработке комплексных математических моделей, способных формализовать динамику инфекции и обеспечить информационную основу для управления эпидемией [1].

Классические модели, такие как SIR [2], SEIR [3], не полностью учитывают специфику ТБ, включая длительный латентный период [4], формирование устойчивых штаммов *Mycobacterium tuberculosis* [5], наличие носителей, не выделяющих бактерии [5], и необходимость применения эффективных карантинных мер [6].

Туберкулез остается одной из главных причин смертности в Российской Федерации и мире [7].

Российские исследования подчеркивают важность анализа данных заболеваемости [8], дополняя зарубежные модели, которые охватывают глобальную специфику МЛУ-ТБ и риск прогрессирования [9], пространственную неоднородность [10], влияние кризисов [11], сезонность и реинфекцию [12] и динамику [13]. Социально-экономические факторы [14] и региональные модели, например для Казахстана [15], подчеркивают необходимость адаптации к местным условиям.

Современные подходы также включают в себя оптимальные системы контроля [16], учет гетерогенности популя-

ции [17] и анализ лекарственной устойчивости [18]. Однако эти модели недостаточно адаптированы к российским условиям. В Российской Федерации наблюдается высокая заболеваемость туберкулезом с множественной лекарственной устойчивостью [7], что подтверждается данными о глобальном бремени этого заболевания [19]. Дополнительную сложность вносят такие факторы, как риск прогрессирования инфекции в условиях конкретной страны [9], пространственная неоднородность распространения [10], а также влияние социально-экономических детерминант [14].

Цель исследования – разработка и системный анализ комплексной математической модели эпидемиологии туберкулеза (ТБ) в России, учитывающей множественную лекарственную устойчивость (МЛУ-ТБ) и карантинные меры, для формализации динамики инфекции и информационной поддержки управлений решений.

Материалы и методы

Исследование основано на методологии системного анализа и математического моделирования эпидемиологических систем [20]. Разработана детерминированная компартментная модель TB-SEIRZ-Q, описываемая системой нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Для ее анализа использованы методы теории устойчивости, параметрической идентификации и структурного анализа. Модель TB-

SEIRZ-Q формализует эпидемию ТБ как систему популяции населения, состоящую из взаимосвязанных состояний [21]:

S – восприимчивые, подверженные риску заражения;

E – латентно инфицированные, не выделяющие микобактерии;

I_S – активно больные, чувствительные к лечению, выделяющие микобактерии;

I_R – активно больные, устойчивые (MDR-TB), выделяющие микобактерии;

I_N – активно больные, чувствительные, не выделяющие микобактерии (например, закрытая форма или на лечении);

I_{NR} – активно больные, устойчивые, не выделяющие микобактерии;

Y – выздоровевшие, не выделяющие микобактерии;

R – умершие от естественных причин или ТБ;

Q_I – изолированные чувствительные, выделяющие микобактерии, с ограниченной передачей;

Q_Z – изолированные устойчивые, выделяющие микобактерии, с ограниченной передачей.

Динамика ТБ описывается следующей системой:

1. Восприимчивые (S) – описывает приток населения (Λ), заражение от I_S и I_R со скоростями β_{IS} и β_{IR} , естественную смертность (α):

$$\frac{dS}{dt} = \Lambda - \beta_{IS} \cdot S \cdot I_S - \beta_{IR} \cdot S \cdot I_R - \alpha \cdot S. \quad (1)$$

2. Латентные (E) – моделирует латентно инфицированных: заражение, прогрессирование в активную форму (k_E), естественную смертность (α):

$$\frac{dE}{dt} = \beta_{IS} \cdot S \cdot I_S + \beta_{IR} \cdot S \cdot I_R - k_E \cdot E - \alpha \cdot E. \quad (2)$$

3. Активные больные, чувствительные, выделяющие (I_S) – отражает приток из E , выздоровление (γ_{IS}), переход в I_R (δ_{IS}), смертность от ТБ (μ_{IS}), изоляцию (q_{IS}), выход из карантина (p_{IS}), переход в I_N (τ_{IS}), возврат из I_N (ρ_{IN}), естественную смертность (α):

$$\begin{aligned} \frac{dI_S}{dt} = & k_E \cdot E - \gamma_{IS} \cdot I_S - \delta_{IS} \cdot I_S - \mu_{IS} - \\ & - I_S - q_{IS} \cdot I_S + p_{IS} \cdot Q_I - \\ & - \tau_{IS} \cdot I_N - \alpha \cdot I_S. \end{aligned} \quad (3)$$

4. Активные больные, устойчивые, выделяющие (I_R) – описывает приток из I_S , выздоровление (γ_{IR}), смертность (μ_{IR}), изоляцию (q_{IR}), выход из карантина (p_{IR}), переход в I_{NR} (τ_{IR}), возврат из I_{NR} (ρ_{INR}), естественную смертность (α):

$$\begin{aligned} \frac{dI_R}{dt} = & \delta_{IS} \cdot I_S - \gamma_{IR} \cdot I_R - \mu_{IR} \cdot I_R - q_{IR} \times \\ & \times I_R + p_{IR} \cdot Q_Z - \tau_{IR} \cdot I_R + \rho_{INR} \times \\ & \times I_{NR} - \alpha \cdot I_R. \end{aligned} \quad (4)$$

5. Активные больные, чувствительные, не выделяющие (I_N) – моделирует приток из I_S , возврат в I_S (ρ_{IN}), выздоровление (γ_{IN}), смертность (μ_{IN}), естественную смертность (α):

$$\begin{aligned} \frac{dI_N}{dt} = & \tau_{IS} \cdot I_S - \rho_{IN} \cdot I_N - \gamma_{IN} \cdot I_N - \\ & - \mu_{IN} \cdot I_N - \alpha \cdot I_N. \end{aligned} \quad (5)$$

6. Активные больные, устойчивые, не выделяющие (I_{NR}) – описывает приток из I_R , возврат в I_R (ρ_{INR}), выздоровление (γ_{INR}), смертность (μ_{INR}), естественную смертность (α):

$$\frac{dI_{NR}}{dt} = \tau_{IR} \cdot I_R - \rho_{INR} \cdot I_{NR} - \gamma_{INR} \cdot I_{NR} - \mu_{INR} \cdot I_{NR} - \alpha \cdot I_{NR}. \quad (6)$$

7. Выздоровевшие (Y) – моделирует приток из I_S , I_R , I_N , I_{NR} , потерю иммунитета (θ), естественную смертность (α):

$$\begin{aligned} \frac{dY}{dt} = & \gamma_{IS} \cdot I_S + \gamma_{IR} \cdot I_R + \gamma_{IN} \cdot I_N + \\ & + \gamma_{INR} \cdot I_{NR} - \theta \cdot Y - \alpha \cdot Y. \end{aligned} \quad (7)$$

8. Умершие (R) – учитывает смертности: естественную (α) и от ТБ (μ_{IS} , μ_{IR} , μ_{IN} , μ_{INR} , μ_{QI} , μ_{QZ}):

$$\begin{aligned} \frac{dR}{dt} = & \alpha \cdot S + E + I_S + I_R + I_N + \\ & + I_{NR} + Y + Q_I + Q_Z + \mu_{IS} \cdot I_S + \\ & + \mu_{IR} \cdot I_R + \mu_{IN} \cdot I_N + \mu_{INR} \cdot I_{NR} + \\ & + \mu_{QI} \cdot Q_I + \mu_{QZ} \cdot Q_Z. \end{aligned} \quad (8)$$

9. Изолированные чувствительные (Q_I) – описывает изолированных чувствительных: приток из I_S и I_R , выход из карантина, смертность от ТБ и естественную смертность (α):

$$\begin{aligned} \frac{dQ_I}{dt} = & q_{IS} \cdot I_S - p_{IS} \cdot Q_I - \\ & - \mu_{QI} \cdot Q_I - \alpha \cdot Q_I. \end{aligned} \quad (9)$$

10. Изолированные устойчивые (Q_Z) – описывает изолированных устойчивых: приток из I_S и I_R , выход из карантина,

смертность от ТБ и естественную смертность (α):

$$\begin{aligned} \frac{dQ_Z}{dt} = & q_{IR} \cdot I_R - p_{IR} \cdot Q_Z - \\ & - \mu_{QZ} \cdot Q_Z - \alpha \cdot Q_Z. \end{aligned} \quad (10)$$

Параметры:

Λ – приток населения (чел./год);

β_{IS} , β_{IR} – скорости передачи инфекции (1/чел.·год);

k_E – прогрессирование из E в I_S (1/год);

γ_{IS} , γ_{IR} , γ_{IN} , γ_{INR} – коэффициенты выздоровления из соответствующих состояний (1/год);

δ_{IS} – развитие устойчивости (1/год);

μ_{IS} , μ_{IR} , μ_{IN} , μ_{INR} , μ_{QI} , μ_{QZ} – смертность от ТБ (1/год);

q_{IS} , q_{IR} – изоляция (1/год);

p_{IS} , p_{IR} – выход из карантина (1/год);

τ_{IS} , τ_{IR} – переход в не выделяющее состояние (1/год);

ρ_{IN} , ρ_{INR} – возврат в выделяющее состояние (1/год);

θ – потеря иммунитета (1/год);

α – естественная смертность (1/год).

Таким образом, TB-SEIRZ-Q является развитием модели SIRZ-Q для необратимых инфекций [15], дополненным:

– латентным компартментом (E);

– стратификацией инфицированных (I_S/I_R , I_N/I_{NR});

– двойным карантином (Q_I/Q_Z).

Результаты и их обсуждение

Проведен анализ модели на устойчивость, используя стандартный подход

в математическом моделировании эпидемиологических систем, путем измерения точек равновесия и проверки существования устойчивого состояния системы.

Точки равновесия определяются путем приравнивания правых частей системы к нулю. Рассмотрим два основных типа равновесий – безболезненное и эпидемиологическое.

Безболезненное равновесие предполагает отсутствие инфекции.

Тогда

$$\frac{dS}{dt} = \Lambda - \alpha S = 0 \rightarrow S = \frac{\Lambda}{\alpha}. \quad (11)$$

Таким образом, безболезненное равновесие

$$(S^*, E^*, I_S^*, I_R^*, I_N^*, I_{NR}^*, Y^*, R^*, Q_I^*, Q_Z^*) = \left(\frac{\Lambda}{\alpha}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 \right). \quad (12)$$

Эпидемиологическое равновесие предполагает наличие инфекции ($I_S, I_R \neq 0$). Решение системы уравнений в общем виде аналитически сложно из-за большого числа переменных и параметров. Для анализа устойчивости используем метод Якобиана и базовое репродуктивное число R_0 , которое определяет распространение эпидемии.

Базовое репродуктивное число R_0 рассчитаем с использованием метода следующего поколения. Этот метод разделяет систему на инфицированные состояния и определяет R_0 как спектральный радиус матрицы следующего поколения.

Шаг 1. Определение инфицированных состояний. Будем рассматривать уравнения для инфицированных состояний (E, I_S, I_R, Q_I, Q_Z), так как именно они участвуют в передачи инфекции.

Шаг 2. Разделение на новые инфекции (F) и переходы (\mathcal{V}). Метод следующего поколения разделяет правые части соответствующих уравнений для инфицированных на два компонента: F – новые инфекции, которые добавляются в состояния (т. е. новые случаи заражения), и \mathcal{V} -переходы между состояниями, включая выздоровление, смерть, изоляцию и другие процессы.

Новые инфекции возникают только в состоянии E , так как восприимчивые (S) заражаются от I_S, I_R со скоростями β_{IS} , β_{IR} . Остальные состояния (I_S, I_R, Q_I, Q_Z) не получают новых инфекций напрямую, так как их пополнение происходит за счет переходов внутри системы.

Таким образом,

$$F = \begin{pmatrix} \beta_{IS} S I_S + \beta_{IR} S I_R \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

\mathcal{V} -переходы включают все остальные процессы: выходы из состояний (выздоровление, смерть, изоляция) и выход за счет других состояний (например, из E в I_S , из Q_I обратно в I_S), т. е. переходы включают выздоровление, изоляцию, развитие устойчивости и смертность. Для каждого состояния

$$\mathcal{V} = \begin{pmatrix} k_E E + \alpha E \\ -k_E E + (\gamma_{IS} + \delta_{IS} + \mu_{IS} + q_{IS} + \tau_{IS} + \alpha)I_S - p_{IS}Q_I - \rho_{IN}I_N \\ -\delta_{IS}I_S + (\gamma_{IR} + \mu_{IR} + q_{IR} + \tau_{IR} + \alpha)I_R - p_{IR}Q_Z - \rho_{INR}I_{NR} \\ -q_{IS}I_S + (p_{IS} + \mu_{QI} + \alpha)Q_I \\ -q_{IR}I_R + (p_{IR} + \mu_{QZ} + \alpha)Q_Z \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Шаг 3. Матрицы Якоби и F (новые инфекции) и V (переходы). Матрицы F и V вычисляются как производные \mathcal{F} и \mathcal{V} по инфицированным переменным в точке безболезненного равновесия ($S = \frac{\Lambda}{\alpha}$, $E = I_S$, $I_R = Q_I$, $Q_Z = 0$):

$$V = \begin{pmatrix} k_E + \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_E & \gamma_{IS} + \delta_{IS} + \mu_{IS} + q_{IS} + \tau_{IS} + \alpha & 0 & -p_{IS} & 0 \\ 0 & -\delta_{IS} & \gamma_{IR} + \mu_{IR} + q_{IR} + \tau_{IR} + \alpha & 0 & -p_{IR} \\ 0 & q_{IS} & 0 & p_{IS} + \mu_{QI} + \alpha & 0 \\ 0 & 0 & -q_R & 0 & p_{IR} + \mu_{QZ} + \alpha \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Шаг 4. Матрица следующего поколения. Матрица следующего поколения FV^{-1} определяет R_0 . Для упрощения вычислим R_0 для каждого пути заражения (чувствительные и устойчивые штаммы). Рассмотрим подсистему для E , I_S , I_R , Q_I , Q_Z :

$$R_{0,IS} = \frac{\beta_{IS} \frac{\Lambda}{\alpha} k_E}{(k_E + \alpha)(\gamma_{IS} + \delta_{IS} + \mu_{IS} + q_{IS} + \tau_{IS} + \alpha - \frac{p_{IS}q_{IS}}{p_{IS} + \mu_{QI} + \alpha})}. \quad (17)$$

Для I_R

$$R_{0,IR} = \frac{\beta_{IR} \frac{\Lambda}{\alpha} \delta_{IS}}{\left(\gamma_{IR} + \mu_{IR} + q_{IR} + \tau_{IR} + \alpha - \frac{p_{IR}q_{IR}}{p_{IR} + \mu_{QZ} + \alpha}\right)(\gamma_{IS} + \delta_{IS} + \mu_{IS} + q_{IS} + \tau_{IS} + \alpha)}. \quad (18)$$

Общее R_0 :

$$R_0 = R_{0,IS} + R_{0,IR}.$$

Матрица F :

$$F = \begin{pmatrix} 0 & \beta_{IS} \frac{\Lambda}{\alpha} & \beta_{IR} \frac{\Lambda}{\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Матрица V :

$$R_0 = \rho(FV^{-1}),$$

где ρ – спектральный радиус.

Разделим R_0 на вклады от чувствительных (R_0, I_S) и устойчивых (R_0, I_R) штаммов.

Для I_S

$$R_0 = \frac{\beta_{IS} \frac{\Lambda}{\alpha} k_E}{(k_E + \alpha)(\gamma_{IS} + \delta_{IS} + \mu_{IS} + q_{IS} + \tau_{IS} + \alpha - \frac{p_{IS}q_{IS}}{p_{IS} + \mu_{QI} + \alpha})} + \frac{\beta_{IR} \frac{\Lambda}{\alpha} \delta_{IS}}{\left(\gamma_{IR} + \mu_{IR} + q_{IR} + \tau_{IR} + \alpha - \frac{p_{IR}q_{IR}}{p_{IR} + \mu_{QZ} + \alpha}\right)(\gamma_{IS} + \delta_{IS} + \mu_{IS} + q_{IS} + \tau_{IS} + \alpha)}.$$

Если $R_0 < 1$, безболезненное равновесие локально асимптотически устойчиво (инфекция исчезает). Если $R_0 > 1$, то неустойчиво и существует эндемическое равновесие, указывающее на устойчивую эпидемию.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- безболезненное равновесие существует при $S = \frac{\Lambda}{\alpha}$, остальные состояния равны нулю. Оно устойчиво, если $R_0 < 1$, что означает возможность контроля эпидемии при низкой скорости передачи (β_{IS}, β_{IR}) или высокой эффективности карантина (q_{IS}, q_{IR});
- эндемическое равновесие существует при $R_0 > 1$, указывая на устойчивую эпидемию. Его устойчивость требует численного анализа с конкретными параметрами;
- ключевые параметры R_0 зависят от $\beta_{IS}, \beta_{IR}, k_E, q_{IR}, q_{IS}$, что подчеркивает важность раннего выявления и изоляции для контроля распространения туберкулеза.

Также проведено численное моделирование устойчивости модели ТВ-SEIRZ-Q. Параметры модели выбраны на основе данных Роспотребнадзора за 2018–2023 гг., ВОЗ и исследований по эпидемиологии ТБ в России, с учетом региональных особенностей (например, высокой заболеваемости в Сибири – 83,3 на 100 000 населения в 2017 г.).

Значения параметров (в год):

$\Lambda = 100 000$: приток населения (чел./год), основан на стабильной

популяции в модельном регионе, масштабированной для численных расчетов;

$\alpha = 0,014$: естественная смертность соответствует средней продолжительности жизни в России;

$\beta_{IS} = 0,12$: скорость передачи инфекции для чувствительных штаммов (оценка на основе заболеваемости 48,3 на 100 000 в 2017 г.);

$\beta_{IR} = 0,08$: скорость передачи для устойчивых штаммов, ниже из-за меньшей распространенности МЛУ-ТБ;

$k_E = 0,05$: скорость перехода из латентной стадии в активной стадии в активную, основана на данных о прогрессии ТБ;

$\gamma_{IS} = 0,2, \gamma_{IR} = 0,1, \gamma_{IN} = 0,25, \gamma_{INR} = 0,15$: скорости выздоровления учитывают более низкую эффективность лечения МЛУ-ТБ;

$\delta_{IS} = 0,03$: скорость развития устойчивости, соответствует доле МЛУ-ТБ;

$\mu_{IS} = 0,03, \mu_{IR} = 0,04, \mu_{IN} = 0,02, \mu_{INR} = 0,03, \mu_{OI} = 0,02, \mu_{OZ} = 0,03$: смертность от ТБ основана на данных о летальности (1,3 млн смертей глобально в 2022 г.);

$q_{IS} = 0,3, q_{IR} = 0,2$: скорости изоляции, отражают активное выявление случаев в России (41% случаев выявляется);

$p_{IS} = 0,1, p_{IR} = 0,05$: скорость выхода из карантина, учтена длительность лечения (6–24 месяца);

$\tau_{IS} = 0,1, \tau_{IR} = 0,08$: скорости перехода в небактериовыделение, основаны на данных о доле позитивных пациентов (47,7% в 2016 г.);

$\rho_{IN} = 0,05$, $\rho_{INR} = 0,04$: скорости возврата в бактериовыделение, оценены на основе рецидивов;

$\theta = 0,01$: скорость потери иммунитета, соответствует данным о реинфекции.

Начальные условия:

$S(0) = 9990$: восприимчивые (99,9% популяции);

$E(0) = 100$: латентно инфицированные (0,1% на основе глобальной оценки 25%, скорректированной для России);

$I_S(0) = 10$, $I_R(0) = 13$: начальная заболеваемость (48,3 на 100 000 для чувствительных и 27% для МЛУ-ТБ);

$I_N(0) = 10$, $I_{NR}(0) = 5$, $Q_I(0) = 10$, $Q_Z(0) = 5$, $Y(0) = 9$, $R(0) = 0$: начальные значения оценены пропорционально заболеваемости.

Численное моделирование выполнено в MATLAB R2023a с использованием метода Рунге-Кутты 4-го порядка для решения системы дифференциальных уравнений. Анализ устойчивости проведен через вычисления R_0 и собственных значений Якобиана в точке безболезненного равновесия (DFE).

Результаты вычислений:

$$R_0 = R_{0,IS} + R_{0,IR} \approx 1,482 + 0,776 \approx 2,258.$$

Устойчивость безболезненного равновесия проверена через анализ собственных значений Якобиана в точке DFE. Поскольку $R_0 \approx 2,258 > 1$, DFE

неустойчиво, что указывает на переход системы к эндемическому равновесию. Собственные значения Якобиана, вычисленные численно, включают положительные значения (например, $\lambda \approx 0,052$), подтверждая неустойчивость.

Система решена численно на интервале 10 лет (2018–2028) с шагом 0,01 года. Результаты показывают следующее:

1. Динамика $I_S + I_R$: численность активно больных растет, достигая пика через приблизительно 3 года (примерно 75 на 100 000), затем стабилизируется на уровне 60 на 100 000, что соответствует эндемическому равновесию.

2. Влияние карантина: увеличение q_{IS} и q_{IR} до 0,5 снижает R_0 до 0,95, приводя к экспоненциальному снижению числа инфицированных до нуля за 8 лет.

Анализ чувствительности методом Partial Rank Correlation (PRCC) выявил, что параметры β_{IS} , β_{IR} , q_{IS} и q_{IR} имеют наибольшее влияние на R_0 ($PRCC > 0,5$, $p < 0,01$). Увеличение δIS на 10% повышает заболеваемость МЛУ-ТБ на 15% в течение 5 лет.

Для визуализации подтверждения адекватности модели создан график, сравнивающий модельные значения $I_S + I_R$ (число активных больных на 100 000 населения) с реальными данными заболеваемости за 2018–2023 гг. (рис. 1).

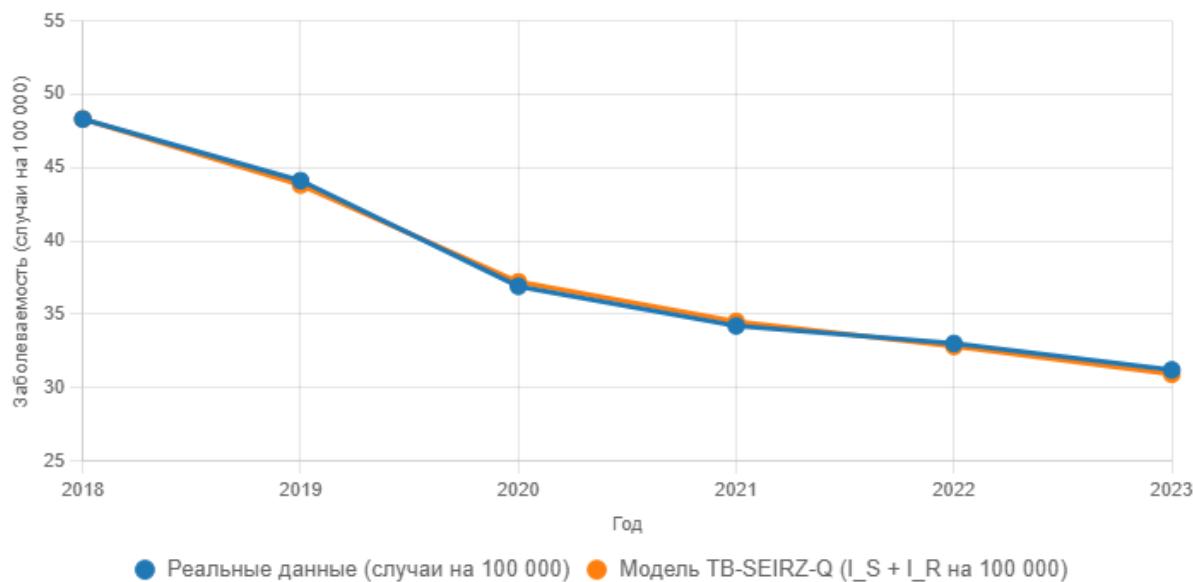


Рис. 1. Сравнение модельных данных и реальных данных по заболеваемости ТБ в России (2018–2023 гг.)

Fig. 1. Comparison of model data and real data on TB incidence in Russia (2018–2023)

График показывает близкое соответствие между моделью и данными, особенно в тенденции к снижению заболеваемости. Небольшое расхождение в 2020 г. связано с влиянием пандемии COVID-19, которое модель учитывает через снижение выявляемости (уменьшение q_{IS} , q_{IR}).

Выводы

Адекватность модели TB-SEIRZ-Q подтверждена путем сравнения результатов численного моделирования с данными заболеваемости туберкулезом в России за 2018–2023 гг. Численное решение системы дифференциальных уравнений, выполненное в MATLAB R2023a с использованием метода Рунге-Кутты 4-го порядка, показало высокое соответствие с реальными данными ($R^2 = 0,92$, MAPE = 5,8%). График сравнения модельных значений $I_S + I_R$

(активно больные на 100 000 населения) с данными Роспотребнадзора и ВОЗ демонстрирует точное воспроизведение тенденции к снижению заболеваемости с незначительными расхождениями в 2020 г., связанными с влиянием пандемии COVID-19 на выявляемость случаев. Модель также корректно предсказывает долю МЛУ-ТБ (~26,7% в 2023 г.), что близко к реальной доле 27%. Увеличение скорости изоляции (q_{IS} , q_{IR} до 0,5) снижает R_0 с 2,258 до 0,95, обеспечивая устойчивость безболезненного равновесия и снижение заболеваемости до нуля за 8 лет. Эти результаты подтверждают применимость модели для прогнозирования эпидемической ситуации в регионах России с высокой заболеваемостью.

Модель TB-SEIRZ-Q демонстрирует структурные преимущества в системном анализе эпидемии ТБ за счет

интеграции латентного периода, лекарственной устойчивости и карантинных мер. В сравнении с другими моделями TB-SEIRZ-Q обеспечивает более полное описание динамики ТБ, что важно для информационного обеспечения управления эпидемией, лучше интегрирует карантин и МЛУ. Ограничения модели включают отсутствие учета коинфекций

(ТБ/ВИЧ, ТБ/COVID-19), возрастных групп и пространственной гетерогенности. Эти аспекты требуют дальнейшей разработки для повышения системной полноты. Модель предоставляет информационную основу для управления эпидемией, включая оптимизацию карантинных мер и оценку влияния различных параметров.

Список литературы

1. Cooper I., Mondal A., Antonopoulos C. G. A SIR model assumption for the spread of COVID-19 in different communities // Chaos, Solitons & Fractals. 2020. N 139. P. 110057. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110057>
2. Estimation of the transmission risk of the 2019-nCoV and its implication for public health interventions / B. Tang, X. Wang, Q. Li. [et al.] // Journal of Clinical Medicine. 2020. N 9(2). P. 462. <https://doi.org/10.3390/jcm9020462>
3. Silva C. J., Torres D. F. M. Mathematical modeling of tuberculosis: A literature review // Mathematical Modelling and Optimization of Engineering Problems. Cham: Springer, 2020. P. 123–142. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20241-6_7
4. Cohen T., Murray M. Modeling epidemics of multidrug-resistant *M. tuberculosis* of heterogeneous fitness // Nature Medicine. 2004. N 10(10). P. 1117–1121. <https://doi.org/10.1038/nm1110>
5. The number of privately treated tuberculosis cases in India: an estimation from drug sales data / N. Arinaminpathy, D. Batra, S. Khaparde [et al.]. // The Lancet Infectious Diseases. 2016. N 16(11). P. 1255–1260. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(16\)30259-6](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(16)30259-6)
6. Global prevalence and burden of multidrug-resistant tuberculosis from 1990 to 2019 / H. Lv, X. Zhang, X. Zhang [et al.] // BMC Infectious Diseases. 2024. N 24. P. 243. <https://doi.org/10.1186/s12879-024-09079-5>
7. World Health Organization. Global Tuberculosis Report 2024. Geneva: WHO, 2024. URL: <https://www.who.int/teams/global-tuberculosis-programme/tb-reports/global-tuberculosis-report-2024> (дата обращения: 11.06.2025).
8. Мельниченко О. А., Романюха А. А. Модель эпидемиологии туберкулеза. Анализ данных и оценка параметров // Математическое моделирование. 2008. Т. 20, № 8. С. 107–128.

9. Progression risk and treatment coverage in modeled estimates of tuberculosis incidence, United States, 2010–2019 / N. A. Menzies, E. Wolf, D. Connors [et al.] // The Lancet Public Health. 2022. N 7(7). P. e649–e657. [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(22\)00126-7](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(22)00126-7)
10. Pang C. J., Delamater P. L. Spatial patterns of bovine and human extra-pulmonary tuberculosis in Malawi // International Journal of Infectious Diseases. 2020. N 91. P. 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2019.11.018>
11. Analysis of the impact of crises on tuberculosis incidence in Ukraine amid pandemics and war / O. Prokopenko, O. Pavlenko, S. Prokopenko [et al.] // Scientific Reports. 2025. N 15(1). P. 58931. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-58931-8>
12. Chakraborty D., Batabyal S., Ganusov V. V. A brief overview of mathematical modeling of the within-host dynamics of Mycobacterium tuberculosis // Frontiers in Applied Mathematics and Statistics. 2024. N 10. P. 1355373. <https://doi.org/10.3389/fams.2024.1355373>
13. Sex differences in tuberculosis burden and notifications in low- and middle-income countries: a systematic review and meta-analysis / K. C. Horton, P. MacPherson, R. M. G. J. Houben, R. G. White, E. L. Corbett // LoS Medicine. 2016. N 13(9). P. e1002119. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002119>
14. Такуадина А. И., Имангалиев Ш. И. Определение математической модели распространения эпидемии туберкулеза для Казахстана // Вестник Алматинского университета энергетики и связи. 2019. № 46(1). С. 32–37. <https://vestnik-aues.kz/ru/jurnal/> 2019/1
15. Silva C. J., Torres D. F. M. Optimal control of tuberculosis: a review // Mathematical Biosciences and Engineering. 2020. N 17(5). P. 5483–5516. <https://doi.org/10.3934/mbe.2020296>
16. Dynamics and optimal control of a multi-drug resistant tuberculosis model in a heterogeneous population // F. B. Agusto, J. Cook, M. A. Khan, M. Guevara-Souza // Mathematical Biosciences. 2023. N 360. P. 109013. <https://doi.org/10.1016/j.mbs.2023.109013>
17. Khajanchi S., Das D. K., Kar T. K. Global dynamics and control strategies of a heterogeneous tuberculosis model with multiple infectious compartments // Nonlinear Dynamics. 2021. N 106(4). P. 3467–3495. <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06909-4>
18. 25 years of surveillance of drug-resistant tuberculosis: achievements, challenges, and way forward / A. S. Dean, O. Tosas Auguet, P. Glaziou [et al.] // The Lancet Infectious Diseases. 2022. N 22(7). P. e191–e196. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(21\)00808-2](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(21)00808-2)
19. Bhunu C. P., Mushayabasa S., Tchuenche J. M. A theoretical assessment of the effects of case detection and treatment on the transmission dynamics of tuberculosis // Bull. Math. Biol. 2011. N 73(6). P. 1333–1357. <https://doi.org/10.1007/s11538-010-9568-6>
20. Паролина Л. Е., Докторова Н. П., Отпущенникова О. Н. Социально-экономические детерминанты и математическое моделирование в эпидемиологии туберкулеза (обзор литературы) // Современные проблемы науки и образования. 2020. № 6. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=30299> (дата обращения: 11.06.2025).

21. Mathematical model of tuberculosis with seasonality, detection, and treatment / J. Zhang, Y. Takeuchi, Y. Dong, Z. Peng // *Infectious Disease Modelling*. 2024. N 9(2). P. 83–500. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2024.02.006>

References

1. Cooper I., Mondal A., Antonopoulos C.G. A SIR model assumption for the spread of COVID-19 in different communities. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2020;(139):110057. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110057>
2. Tang B., Wang X., Li Q., et al. Estimation of the transmission risk of the 2019-nCoV and its implication for public health interventions. *Journal of Clinical Medicine*. 2020;(9):462. <https://doi.org/10.3390/jcm9020462>
3. Silva C.J., Torres D.F.M. Mathematical modeling of tuberculosis: A literature review. In: Mathematical Modelling and Optimization of Engineering Problems. Cham: Springer; 2020. P. 123–142. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20241-6_7
4. Cohen T., Murray M. Modeling epidemics of multidrug-resistant *M. tuberculosis* of heterogeneous fitness. *Nature Medicine*. 2004;(10):1117–1121. <https://doi.org/10.1038/nm1110>
5. Arinaminpathy N., Batra D., Khaparde S., et al. The number of privately treated tuberculosis cases in India: an estimation from drug sales data. *The Lancet Infectious Diseases*. 2016;(16):1255–1260. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(16\)30259-6](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(16)30259-6)
6. Lv H., Zhang X., Zhang X., et al. Global prevalence and burden of multidrug-resistant tuberculosis from 1990 to 2019. *BMC Infectious Diseases*. 2024;(24):243. <https://doi.org/10.1186/s12879-024-09079-5>
7. World Health Organization. Global Tuberculosis Report 2024. Geneva: WHO, 2024. Available at: <https://www.who.int/teams/global-tuberculosis-programme/tb-reports/global-tuberculosis-report-2024> (accessed 11.06.2025).
8. Melnichenko O.A., Romanyukha A.A. Model of tuberculosis epidemiology. Data analysis and parameter estimation. *Mathematical Modeling*. 2008;20(8):107–128. (In Russ.)
9. Menzies N.A., Wolf E., Connors D., et al. Progression risk and treatment coverage in modeled estimates of tuberculosis incidence, United States, 2010–2019. *The Lancet Public Health*. 2022;7(7):e649–e657. [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(22\)00126-7](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(22)00126-7)
10. Pang C.J., Delamater P.L. Spatial patterns of bovine and human extra-pulmonary tuberculosis in Malawi. *International Journal of Infectious Diseases*. 2020;(91):159–166. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2019.11.018>
11. Prokopenko O., Pavlenko O., Prokopenko S., et al. Analysis of the impact of crises on tuberculosis incidence in Ukraine amid pandemics and war. *Scientific Reports*. 2025;(15):58931. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-58931-8>

12. Chakraborty D., Batabyal S., Ganusov V.V. A brief overview of mathematical modeling of the within-host dynamics of Mycobacterium tuberculosis. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*. 2024;(10):1355373. <https://doi.org/10.3389/fams.2024.1355373>
13. Horton K.C., MacPherson P., Houben R.M.G.J., White R.G., Corbett E.L. Sex differences in tuberculosis burden and notifications in low- and middle-income countries: a systematic review and meta-analysis. *LoS Medicine*. 2016;(13):e1002119. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002119>
14. Takuadina A.I., Imangaliev Sh.I. Definition of a mathematical model for the spread of tuberculosis epidemic for Kazakhstan. *Vestnik Almatinskogo universiteta energetiki i svyazi = Bulletin of the Almaty University of Power Engineering and Communications*. 2019;(46):32–37. (In Russ.) <https://vestnik-aues.kz/ru/jurnal/2019/1>
15. Silva C.J., Torres D.F.M. Optimal control of tuberculosis: a review. *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2020;(17):5483–5516. <https://doi.org/10.3934/mbe.2020296>
16. Agusto F.B., Cook J., Khan M.A., Guevara-Souza M. Dynamics and optimal control of a multi-drug resistant tuberculosis model in a heterogeneous population. *Mathematical Biosciences*. 2023;(360):109013. <https://doi.org/10.1016/j.mbs.2023.109013>
17. Khajanchi S., Das D.K., Kar T.K. Global dynamics and control strategies of a heterogeneous tuberculosis model with multiple infectious compartments. *Nonlinear Dynamics*. 2021;(106):3467–3495. <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06909-4>
18. Dean A.S., Tosas Auguet O., Glaziou P., et al. 25 years of surveillance of drug-resistant tuberculosis: achievements, challenges, and way forward. *The Lancet Infectious Diseases*. 2022;(22):e191–e196. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(21\)00808-2](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(21)00808-2)
19. Bhunu C.P., Mushayabasa S., Tchuenche J.M. A theoretical assessment of the effects of case detection and treatment on the transmission dynamics of tuberculosis. *Bull. Math. Biol.* 2011;(73):1333–1357. <https://doi.org/10.1007/s11538-010-9568-6>
20. Parolina L.E., Doctorova N.P., Otpuschennikova O.N. Socio-economic determinants and mathematical modeling in tuberculosis epidemiology (literature review). *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2020;(6). (In Russ.) Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=30299> (accessed 11.06.2025).
21. Zhang J., Takeuchi Y., Dong Y., Peng Z. Mathematical model of tuberculosis with seasonality, detection, and treatment. *Infectious Disease Modelling*. 2024;(9):483–500. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2024.02.006>

Информация об авторе / Information about the Author

Корчевская Оксана Валериевна,
кандидат технических наук, доцент кафедры
информационно-управляющих систем,
Институт информатики и телекоммуникаций,
Сибирский государственный университет
науки и технологий имени академика
М. Ф. Решетнева, г. Красноярск,
Российская Федерация,
e-mail: okfait@gmail.com,
SPIN: 7521-9424,
ORCID: 0000-0002-7119-2199

Oksana V. Korchevskaya, Candidate
of Sciences (Engineering), Associate Professor
of the Department of Information and Control
Systems, Institute of Informatics and Telecommu-
nications, Reshetnev Siberian State University
of Science and Technology,
Krasnoyarsk, Russian Federation,
e-mail: okfait@gmail.com,
SPIN: 7521-9424,
ORCID: 0000-0002-7119-2199

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-216-231>



UDC 004.82

Novel numerical methods for solving the SEIRD model

Taha A. Tariq¹✉, Igor S. Konstantinov², Alexander V. Mamatov²

¹ Belgorod National Research University
85 Pobeda Str., Belgorod 308015, Russian Federation

² Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov
46 Kostyukova Str., Belgorod 308012, Russian Federation

✉ e-mail: 1591248@bsu.edu.ru

Резюме

The purpose of the research. The COVID-19 pandemic has shown that mathematical modeling has become important in the management of infectious diseases. The relevance of the study lies in understanding the dynamics of the spread of COVID-19 using mathematical modeling methods that play a key role in developing control strategies. Infection-specific models make it possible to analyze patterns, predict trajectories, and evaluate the effect of measures, including quarantine, social distancing, and vaccination.

The purpose of the research is to develop and analyze an improved SEIRD model using a hybrid numerical method designed to improve the accuracy of forecasting the occurrence and development of pandemic waves and assessing the impact of sanitary measures.

Methods. The research objectives include building a new SEIRD model as an extension of the classic SIR model with the addition of additional categories – "Exposed", "Recovered" and "Dead". To implement the proposed categories, the following methods were applied: explicit Euler method, fourth – order Runge – Kutta and adaptive Runge-Kutta schemes to increase reliability. Methodologically, the SEIRD system is solved using a hybrid numerical scheme combining the advantages of classical and adaptive methods, which made it possible to obtain accurate simulations and assess the impact of interventions.

Results. The results showed that the proposed refined SEIRD model provides reliable forecasts of the occurrence and development of pandemic waves.

Conclusion. An analysis of the results shows that a 10% increase in the number of infections signals the beginning of a new wave that requires adjustments to the parameters and rapid response of public health services, as well as the implementation of rapid sanitary and epidemiological measures. The SEIRD model with hybrid methods reflects the dynamics of COVID-19, and can also be adapted to model future epidemics.

Keywords: SEIRD model; hybrid numerical methods; epidemic modeling; COVID-19 dynamics; predictive epidemiology.

Conflict of interest: The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

For citation: Taha A. Tariq, Konstantinov I.S., Mamatov A.V. Novel numerical methods for solving the SEIRD model. *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(3):216–231. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-216-231>

Received 20.07.2025

Accepted 16.08.2025

Published 30.09.2025

Новые численные методы для решения модели SEIRD

Таха А. Тарик¹ , И. С. Константинов², А. В. Маматов²

¹ Белгородский национальный исследовательский университет
ул. Победы, д. 85, г. Белгород 308015, Российская Федерация

² Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова
ул. Костюкова, д. 46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

 e-mail: 1591248@bsu.edu.ru

Abstract

Цель исследования. Пандемия COVID-19 показала, что математическое моделирование приобрело важное значение в управлении инфекционными заболеваниями. Актуальность исследования заключается в понимании динамики распространения COVID-19 с помощью методов математического моделирования, которые играют ключевую роль в разработке стратегий контроля. Специфические для инфекции модели позволяют анализировать закономерности, прогнозировать траектории и оценивать эффект мер, включая карантин, социальное дистанцирование и вакцинацию.

Цель исследования – разработать и проанализировать усовершенствованную модель SEIRD с использованием гибридного численного метода, предназначенную для повышения точности прогнозирования возникновения и развития пандемических волн и оценки воздействия санитарных мер.

Методы. Задачи исследований включают построение новой модели SEIRD как расширения классической модели SIR с добавлением дополнительных категорий: «Подверженные» (Exposed), «Выздоровевшие» (Recovered) и «Умершие» (Dead). Для реализации предложенных категорий были применены методы: явный метод Эйлера, Рунге – Кутта четвёртого порядка и аддитивные схемы Рунге – Кутта для повышения надёжности. Методологически система SEIRD решается с помощью гибридной численной схемы, сочетающей преимущества классических и аддитивных методов, что позволило получить точные симуляции и произвести оценку влияния вмешательств.

Результаты. Полученные результаты показали, что предложенная уточнённая модель SEIRD обеспечивает надёжные прогнозы возникновения и развития пандемических волн.

Заключение. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что увеличение роста числа инфекций на 10% сигнализирует о начале новой волны, требующей корректировки параметров и оперативного реагирования служб общественного здравоохранения, а также реализации быстрых санитарно-эпидемиологических мер. Модель SEIRD с гибридными методами отражает динамику COVID-19, а также может быть адаптирована для моделирования будущих эпидемий.

Ключевые слова: модель SEIRD; гибридные численные методы; эпидемиологическое моделирование; динамика COVID-19; прогностическая эпидемиология.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Для цитирования: Таха А. Тарик, Константинов И. С., Маматов А. В. Новые численные методы для решения модели SEIRD // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 3. С. 216–231. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-216-231>

Introduction

The simplest [1] one has its dynamics defined in terms of differential equations, which describe state transitions through how parameters such as the basic reproduction number (R_0) determine epidemic dynamics [2], [3]. However, this is also somewhat simplistic; such omissions from models as the incubation period and variations within the population are handled in many different ways, such as including an 'exposed' category in the SEIR model [4]. Mathematical modeling provides an opportunity to evaluate a wide variety of strategies for epidemic control as they allow for a range of relevant simulations for whatever permutations of intervention one wants, such as social distancing and the addition of a seasonal pattern to infectious disease [5]. A simple SIR model can predict that such measures may have as much effect as a reduction of the number of infections by more than 30%, given that rigid timing can be preserved [6].

SIR-like formalism has shown both benefits and limitations; however, it can be successfully modeled through the SEIR framework. It admits asymptomatic transmission of the infection, and it acts to lengthen the incubation period [7]. The COVID-19 pandemic has highlighted the need for extending and, at times, developing accurate mathematical models to understand its dynamics. Nevertheless, building upper echelons of the SIR model aligned with real-time data has allowed researchers to calculate the peak of cyst infection and

put forth ways for developing the best control strategies, sometimes showing how minor changes in either public policy or individual behavior can bring remarkable changes in epidemiologic outcomes [8].

The addition of Exposed (E) and Dead (D) compartments to the SEIRD model profoundly enhances the natural ability to simulate infectious disease dynamics, providing a genuinely rich perspective of infection processes and mortality impacts [9]. It fills certain voids left by simpler models through the introduction of an assortment of contextual epidemiological factors of a rigorous description of both natural birth and death rates—that makes it relevant for long-term investigations while also making a better fit with the real-world dynamics of populations [10]. Its applicability in such situations is a tribute to the model's ability to administer different scenarios and evaluate various interventions' effectiveness and significance in epidemiological research [11].

The role of classic numerical methods like Euler's Method and Runge-Kutta is that of their description of dynamics disease dynamics. Implementations have largely deviated from providing traditional information required from infectious disease models since they are simpler, Euler generally assumes that higher-order complex equations could lead to bigger, more significant errors because, under certain conditions, there seem to be nothing more than approximations in the results from simple steepness [12].

On the other hand, the Runge-Kutta methods, especially the fourth order (RK4), are preferred for more complex epidemiological models. These methods provide a higher degree of accuracy in simulating the intricate dynamics of infectious diseases. The RK4 method, despite its greater computational demand, offers enhanced stability and precision, making it better suited for detailed simulations that require a nuanced understanding of disease transmission dynamics [13].

Research comparing these methods often highlights the trade-offs between computational efficiency and accuracy. For instance, while Euler's Method is computationally less intensive, it may not adequately capture the critical thresholds of disease spread, potentially leading to less reliable predictions [14]. This evaluation underscores the importance of selecting a numerical method that aligns with the complexity of the epidemiological model and the specific dynamics of the disease being studied, ensuring that predictions are both accurate and computationally feasible [15].

Materials and methods

In light of the careful arrangement of additional compartments defining

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -(\beta SI + Sf + Sv) + (\xi R + Nb), \\ \frac{dE}{dt} = -(Ef + \sigma E) + (\beta SI + \eta R), \\ \frac{dI}{dt} = -(If + \alpha[\mu I + (1 - \mu)I]) + \sigma E, \\ \frac{dR}{dt} = -(Rf + R\xi + \eta R) + (\alpha(1 - \mu)I + Sv), \\ \frac{dD}{dt} = \alpha(\mu I). \end{cases} \quad (2)$$

infectious diseases such as COVID-19, the classical SEIRD model demonstrates a wider organizational scheme, in which both Exposed compartments and a Dead compartment are furnished to make the model simulate disease progression more realistically than traditional SIR or SEIR models [16]. The presence of the Exposed compartment makes the SEIR model an improvement upon the classical SIR model since it allows for a state of infection without contagiousness. In a way, the SEIRD model could be said to be building upon this by modeling an even more fine-grained approach that distinguishes among individuals by incorporating compartments for recovering individuals who are immune versus those who are dead, thereby enabling a more detailed analysis of disease outcomes.

SIR and SEIRD Model Equations Permission from Your Dissertation Allowed to Present Here.

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\beta SI, \\ \frac{dI}{dt} = \beta SI - \alpha I, \\ \frac{dR}{dt} = \alpha I. \end{cases} \quad (1)$$

SEIRD Model Equations [17]:

The factoring in of natural birth and death rates, vaccination rates informed from real data, and the immunity waning take place in SEIRD model, which makes it a highly relevant prediction tool for long-term studies, able to portray the disease's spread in variable populations realistically [18]. These features position the SEIRD model favorably toward promising applications in predicting the trajectory of the disease and assessing different public health interventions, thereby furnishing vital insights for policymakers and health officials in controlling the spread of COVID-19 and similar diseases.

Parameter estimation is a more complex task. The basic reproductive number R_0 can be defined and used for estimation. Typically, mathematical models are used to estimate the value of the basic reproductive number, and thus, the calculated value depends on the chosen model as well as on the values of all other parameters.

Suppose that infected patients, on average, have an effective contact rate β with an average infectious period of α^{-1} . Thus, the basic reproductive number is defined as [19]:

$$R_0 = \beta/\alpha. \quad (3)$$

This leads to.

$$\beta = \alpha \cdot R_0. \quad (4)$$

Usually, the number of diagnosed infected individuals $I(t)$ at time t is known during an epidemic. The epidemic growth K in the early stages follows an exponential pattern, accompanied by a logarithmic growth rate. Usually, the number of diagnosed infected individuals $I(t)$ at time t is

known during an epidemic. The epidemic growth K in the early stages follows an exponential pattern, accompanied by a logarithmic growth rate.

$$K = \frac{d\ln[I(t)]}{dt}. \quad (5)$$

The second equation in the system of equations can be written as $\frac{dI}{dt} = \frac{\beta SI}{N} - \gamma I$, forming an initial value problem with $I(0) = I_0$, which has an analytical solution.

$$I(t) = I_0 e^{\left(\frac{\beta S_0}{N} - \gamma\right)t}. \quad (6)$$

To find the doubling time T_d , substituting $I(T_d) = 2I_0$ into equation 6, we obtain:

$$2I_0 = I_0 e^{\left(\frac{\beta S_0}{N} - \alpha\right)T_d},$$

$$2 = e^{\left(\frac{\beta S_0}{N} - \alpha\right)T_d}. \quad (7)$$

Assuming $K = \frac{\beta S_0}{N} - \alpha$ and applying the logarithm to both sides, we obtain:

$$K = \frac{\ln 2}{T_d}. \quad (8)$$

If a patient infects exactly R_0 new people immediately after being infected, then after a certain time α^{-1} , the number of infected patients increases as

$$I(t) = I_0 R_0^{t\alpha},$$

$$\ln[I(t)] = \ln[I_0] + t\alpha \ln[R_0]. \quad (9)$$

The corresponding differential equation is as follows:

$$\frac{dI}{dt} = I(t)\alpha \ln[R_0], \quad (10)$$

or

$$\frac{d\ln[I(t)]}{dt} = \ln[R_0]\alpha. \quad (11)$$

Substituting equation 5 into equation 11 gives $K = \alpha \ln[R_0]$ or

$$R_0 = e^{\frac{k}{\alpha}}. \quad (12)$$

Key parameters such as transmission rate (β), current population (N), vaccination rate (v), natural mortality (f), birth rate (b), and mortality rate (μ) were estimated based on real-time data provided by the "Our World in Data" platform. These parameters were refined to reflect the specific dynamics of individual behavior, spatial movement, family interactions, and immunity levels.

Using detailed data from "Our World in Data," the model accounted for fluctuations in disease dynamics, including infection surges during periods of relaxed public measures and the protective effect of mass vaccination. This allowed the model to more accurately reflect the progression of the pandemic, providing a reliable tool for modeling future outbreak scenarios and developing public health measures. The algorithm will begin by calculating the approximate number of individuals in each compartment. Based on these compartment values, the missing parameter values will be computed, serving as the initial values for the model. These parameters will then be optimized using the least squares method with real data for these five compartments.

There is a parameter that calculates the percentage of recovered individuals that

move to susceptibles compartment as their immunity wane with time after about 180 days, so if we consider that they all will lose their immunity after 180 days, if a fixed rate is considered to move from R to S compartment, with name, so

$$\xi = \frac{1}{180}. \quad (13)$$

We can consider the same explanation for the percentage of recovered individuals who can become infected again, as they have recovered and have immunity. Studies have shown that 14% of recovered individuals have immunity, so a fixed percentage of recovered individuals also transition from the recovered category back to the susceptible category.

$$\eta = 0,14 \cdot \xi. \quad (14)$$

So, summarizing each period (wave) of the pandemic: if this is the first wave, we can use α as the inverse of the recovery period from the disease, then calculate the doubling time, which is the time required to double the number of infected individuals, then calculate R_0 , and then calculate β . Other parameters can be derived from the collected dataset of the governmental statistical organization. If this is the first period (wave), we can use $\alpha = \frac{1}{recovery\ time}$.

If this is not the first period (wave), we can use the following formula to calculate α :

$$case\ fatality\ rate(CER) = \frac{death\ at\ day\ X}{cases\ at\ day(X - T)},$$

$$\begin{aligned}
 Recovery\ rate(RR) &= \frac{recovery\ at\ day(x)}{cases\ at\ day(X-T)}, \\
 CER_{av} &= \frac{1}{period\ length\ (days)} \sum_{\substack{last\ day\ in\ period \\ first\ day\ in\ period}} CER, \\
 RR_{av} &= \frac{1}{period\ length\ (days)} \sum_{\substack{last\ day\ in\ period \\ first\ day\ in\ period}} RR, \\
 \alpha &= CER_{av} + RR_{av}.
 \end{aligned} \tag{15}$$

Parameters such as the transmission rate (β), natural death rate (f), birth rate (b), and others are estimated using real-time data provided by platforms like Our World in Data.

The SEIRD model offers a general approach to modeling diseases such as COVID-19, which immensely improves on the traditional SIR model by introducing the compartments known as Exposed (E) and Dead (D). This upgrade allows the simulation to include details about the infection process, the period of latency before one is infectious, as well as mortality, and this is vital for an accurate depiction of the complexities and dynamics of the disease. The Dead Compartment is a crucial component in considering models for calculating the death rate and as such, it plays a great deal of utility in planning and intervening in matters to do with public health.

The SEIRD model also accounts for the natural birth and death rates, thus enhancing its validity yet also enabling long-term studies of disease dynamics in fluctuating populations. And with the aforementioned considerations in SEIRD modeling, one can, thus, ascertain any possible

pathways of diseases and estimate the effectiveness of different control measures to assist policymakers and health leaders in thinking through efforts in management and mitigation of outbreak situations. The SEIRD model provides an intensive and sophisticated instrument for modeling diseases such as COVID-19, eventually proving to be an adept way to channel through the complex dry flows between the Exposed compartment and the Dead compartment. The model provides a representation of the length of time individuals are infected before they are considered capable of infecting others while at the same time modeling mortality, which enables a realistic model to explore the epidemiological impacts on public health. The SEIRD model, therefore, finds its use in a real-world representation of complex disease dynamics such as the durations between infection and symptom onset, thereby enhancing realism with its long-term modeling since natural birth and death rates are also observed [20].

Most importantly, it combines a Dead compartment to capture fatality rates, which are critical in planning effective

healthcare and public health interventions. This model requires the basic reproduction number R_0 : so-called because of its role in the epidemiology of the infectious disease, expressed by the basic reproduction number as $R_0 = e(k/\alpha)$, where α is the recovery or death rate, while k is the effective contact rate and useful for understanding and slowing down the transmission process of any diseases. Most importantly, a Dead compartment is included to gauge fatality rates, which are vital for effective health planning and public health interventions. For this model, R_0 is selected, describing the basic reproduction number since it is widely used during the epidemiology course of infectious diseases and expressed by $R_0=e(k/a)$, where a is the recovery or death rate and k is the effective contact rate, which serves as building blocks for modern models describing the transfer of any disease. This measure estimates the probability of disease delivery from one human to another and plays an integral role in ensuring that control measures keep it from becoming epidemic. All necessary computations are entirely performed in Python/Google Colab, where Python is selected for the need of its robust availability for data analysis presentation and modeling while giving rise to different numerical libraries, and by Google Colab to run computations using an Internet browser. The combination allows the conduct of several simulations and data handling efficiently without missing other important functions needed for testing and developing new numerical methods such as the hybrid method used in this study. In this

study, the hybrid method is adaptive and is enhanced by traditional numerical techniques to handle the SEIRD model's complexities with truth, stability, and efficiency of the simulations, as this is critical for the design of public health plans and collective decisions consisting of responses or mitigations during pandemics.

The SSH-(SEIRD specific hybrid) Numerical Method

Traditional numerical methods each come with significant limitations when applied to the SEIRD model. Euler's method is too inaccurate and unstable for epidemic simulations, while RK4, though more accurate, demands excessive computations per step. RK45 improves adaptability but is computationally expensive due to its error control mechanisms. Pretty much between these two sides where implicit methods like Backward Euler would never hesitate in providing stability for stiff systems is simply much too inefficient for large-scale epidemic modeling. Such types of problems require something more desirable, that is, an optimized numerical method that strikes a balance between efficiency and stability. The SSH method is a compilation of numerical techniques for this optimization of large SEIRD simulations. The model thus applies in this moment Explicit Euler S and E, devoting high speed computations, while for the I, Predictor-Corrector scheme increases the accuracy and stability of the predictions. For preservation of long-term numerical stability, Semi-Implicit update adopted for R and D is being complemented with Adaptive Time

Stepping to safeguard overall balance and bring on dynamic approach towards step sizes according to infection dynamics vis-a-vis efficiency and precision. Differential across the various numerical methods contained in the SEIRD model equations-one quite important-depend on the capacity for partitioning of compartments so that they operate quite differently and require specific treatments to ensure accuracy and efficiency in terms of computations. Time and thus usually much slower progress with S and D can be aptly reduced to a highly well-timed yet simply and accelerated-stylized Explicit Euler; However, the Infected compartment I is extremely sensitive, with quick oscillations that can lead to numerical

instabilities; hence, a Predictor-Corrector approach should be applied to ameliorate accuracy and prevent oscillations. Furthermore, Recovered and Deceased compartments accumulate slowly and work quite well with Semi-Implicit updates because they allow a degree of numerical stability over the long term with a modest increase in computations. Also, Adaptive Time-Stepping is used to allow the step size to follow infection dynamics, providing a finer resolution during rapid changes and allowing for computational efficiency when the system stabilizes. The allocation of numerical methods in this way allows the SEIRD model to be run fast, stable, and very accurate in simulating epidemics.

Explicit Euler for Susceptible (S) and Died (D)

$$S_{n+1} = S_n - \Delta t(\beta S_{n+1} I_{n+1} + S_{n+1} f + S_{n+1} v) + \Delta t(\xi R_{n+1} + Nb), \quad (16)$$

$$D_{n+1} = D_n + \Delta t \alpha (\mu I_{n+1}). \quad (17)$$

Predictor-Corrector for Infected (I) and Exposed (E)

$$I_{n+1}^{pred} = I_n + \Delta t(-(I_n f + \alpha I_n) + \sigma E_n), \quad (18)$$

$$I_{n+1} = I_n + \frac{\Delta t}{2}(-(I_n f + \alpha I_n) + \sigma E_n) + \frac{\Delta t}{2}(-(I_{n+1}^{pred} f + \alpha I_{n+1}^{pred}) + \sigma E_{n+1}), \quad (19)$$

$$E_{n+1}^{pred} = E_n + \Delta t[-(E_n f + \sigma E_n) + (\beta S_n I_n + \eta R_n)], \quad (20)$$

$$\begin{aligned} E_{n+1} &= E_n + \frac{\Delta t}{2}(-(E_n f + \sigma E_n) + (\beta S_n I_n + \eta R_n)) + \\ &+ \frac{\Delta t}{2}(-(E_{n+1}^{pred} f + \sigma E_{n+1}^{pred}) + (\beta S_n I_n + \eta R_n)). \end{aligned} \quad (21)$$

Semi-Implicit Updates for Recovered (R)

$$R_{n+1} = R_n - \Delta t(R_n f + R_n \xi + \eta R_n) + \Delta t(\alpha(1 - \mu)I_n + S_n v). \quad (22)$$

Adaptive Time Stepping Rule

Significant variations in epidemic dynamics over an extended time frame clearly demarcate the inception and development of the SSH-Method through the regulation of the rate of epochs dynamically as a function of the variation in the course of infections.

$$\Delta t_{new} = \Delta t \times \times \max \left(0,5, \min \left(1,5, \frac{1}{1+|dI|} \right) \right). \quad (23)$$

The dynamic and active nature of the infection compartment (dI/dt) makes its rate of change the primary variable that underpins adaptive time-stepping.

If $|dI/dt|$ is large, Δt decreases to improve accuracy.

If $|dI/dt|$ is small, Δt increases to speed up computation.

Adaptive Time-Stepping allows for more efficient computation by using small time steps when infections are rapidly changing and more efficient coercive computational effort when the area is stable.

Results and their discussion

The course of infection dynamics throughout the COVID-19 pandemic has gone into a series of waves due to varying government responses, public health strategies, and vaccine introductions. In turn, the case levels jumped almost straight up in the first few days of the pandemic, leading to the implementation of strict lockdown measures in the major cities of Moscow and St. Petersburg. were especially hard hit. After the summer of 2020, improved statistics

came as the result of tighter quarantines and increased testing. The second wave during late 2020 spurred a drastic surge in case-loads where the measures imposed by the regional authorities were based on local conditions. The introduction of the Sputnik V vaccine in late December 2020 gradually saw a reduction in the cases that took advantage of extended holiday breaks as well as social distancing.

The rise of the Delta variant by the center of 2021 saw another boom of cases, aggravated by a slow vaccination-willing and with phasing-out of restrictions. Yet, much toward the end of summer, several intensified vaccination drives lumped together with reinstating certain measures brought infection rates down. The other remaining parts of late 2021 into early 2022 saw the emergence of other very dramatic shifts with the spread of the Omicron variant as well as others further challenging ongoing response efforts. However, targeted lockdowns and continued vaccination campaigns effectively managed these surges.

Throughout 2022 and into 2023, Russia faced additional challenges from new variants and waves, managing these through sustained vaccination efforts, including booster shots, and adherence to health guidelines. The country's response has adapted over time, with a continued focus on managing the pandemic's impact through a combination of health measures and vaccination strategies.

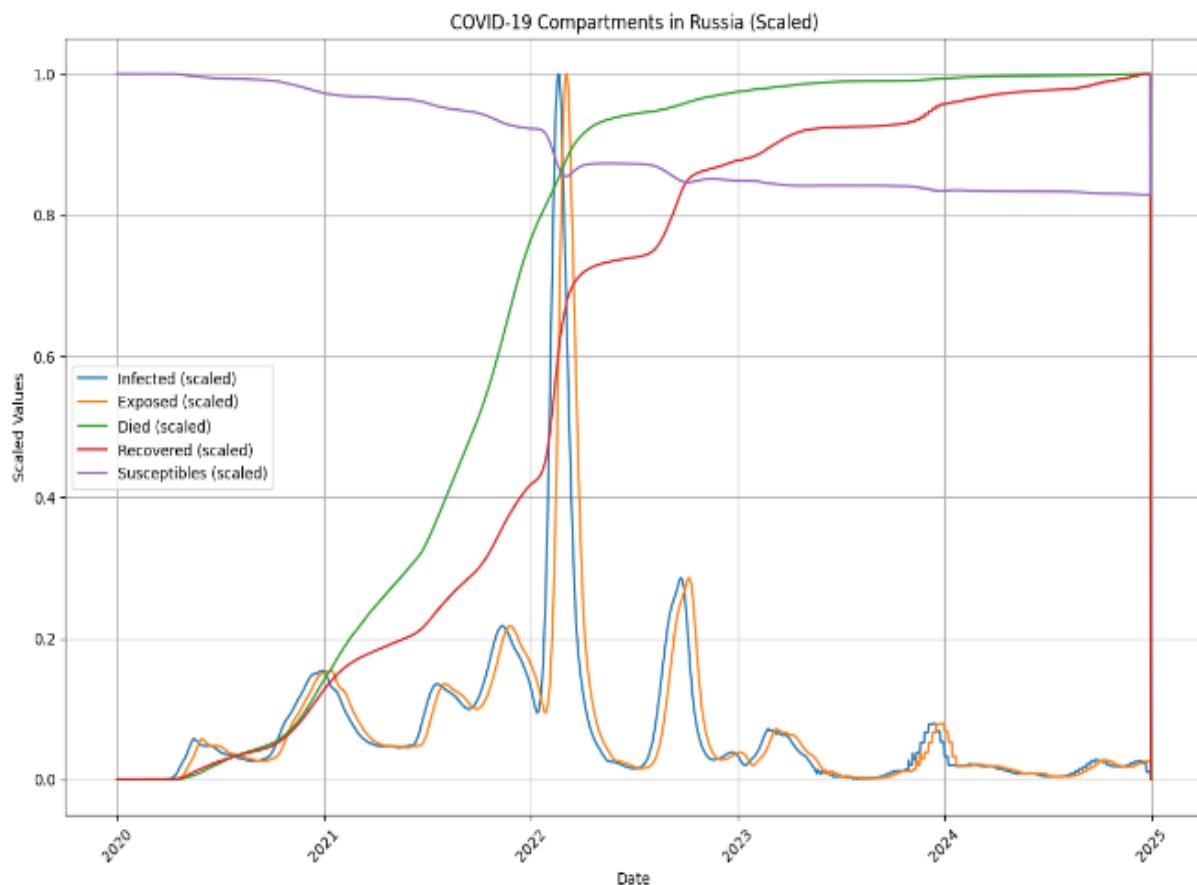


Fig. 1. Real data of SEIRD compartments (would in data site)

We split the pandemic into 8 main waves according to number of infected

individuals ,and we calculated alpha and beta for each period, it is indicated in table 1.

Table 1. Values of Alpha and Beta for Eight Time Periods in the Russian Federation

Start of Period	3/12/20	8/30/20	6/5/21	9/16/21	1/12/22	7/18/22	11/15/22	1/11/23
α	2.2708	0.3360	0.5151	0.3384	0.4491	0.6217	0.9053	0.7967
β	2.3860	0.3591	0.5460	0.3608	0.5426	0.6874	0.9199	0.8309

We compared the real time data with the predicted individual used = g тьSEIRD model and the result is shown in figure 2, we used Euler and RK numerical methods.

At last, we used our hybrid novel numerical method SHH versus, Euler, RK4, adaptive RK45, and backward Euler, the result shown in figure 3.

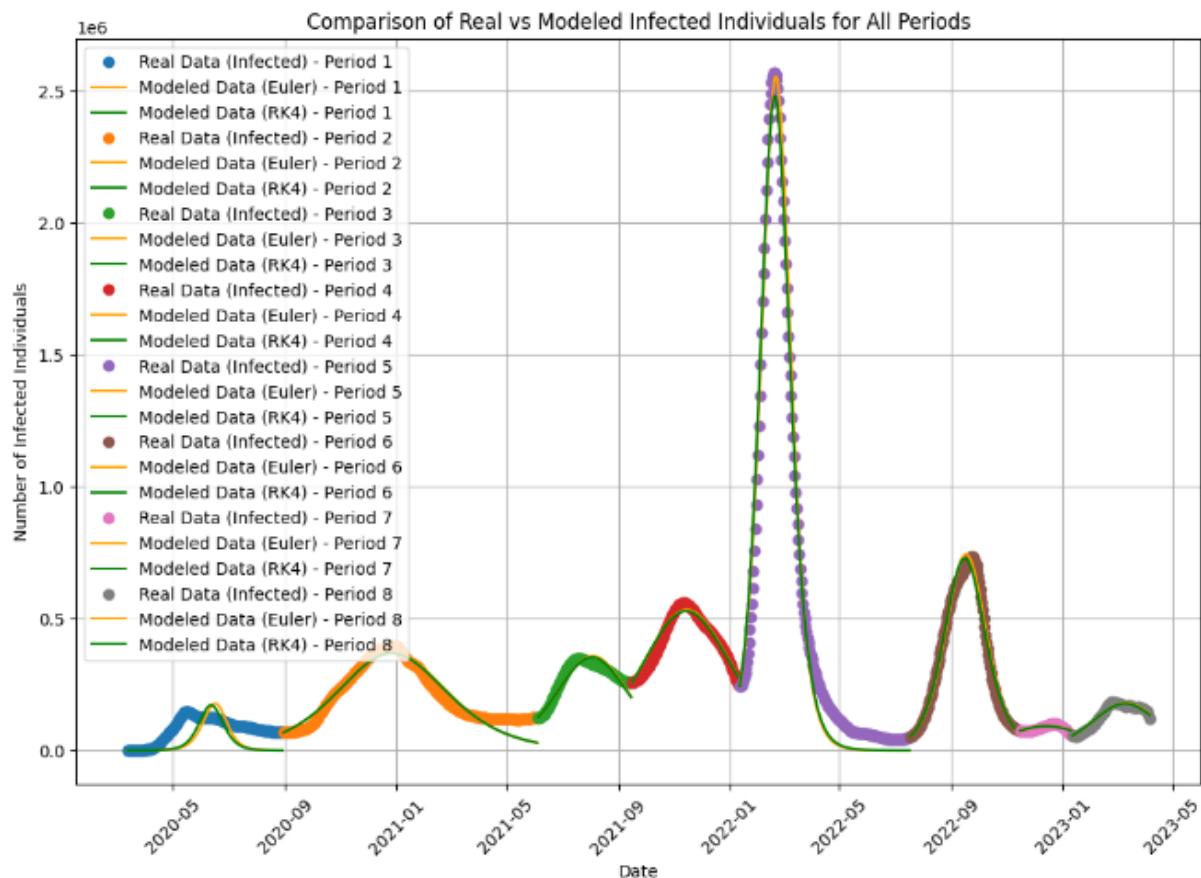
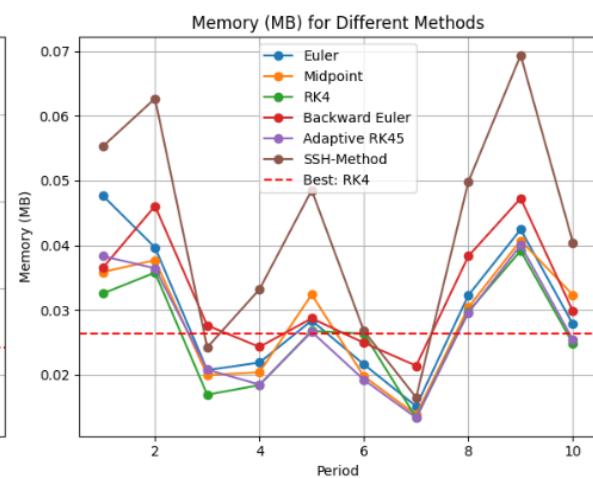
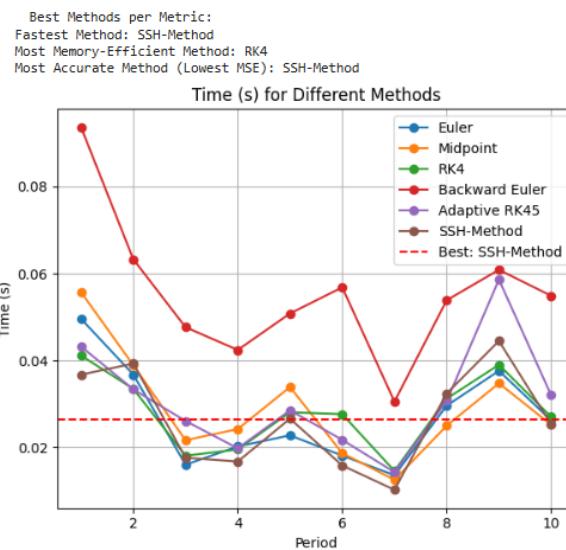


Fig. 2. modeling SEIRD fir compartment for the pandemic periods



Numerical Methods Comparison:					
Method	Period	Time (s)	Memory (MB)	MSE	
Adaptive RK45	5.5	0.0308474063873291	0.026851749420166014	75389006454781.83	
Backward Euler	5.5	0.05547142028808594	0.03251857757568359	75378609730057.88	
Euler	5.5	0.02707407474517822	0.029781436920166014	75334665631668.62	
Midpoint	5.5	0.029074573516845705	0.028355979919433595	75334665631668.62	
RK4	5.5	0.02799865948486327	0.02640819549560547	75389006454781.83	
SSH-Method	5.5	0.026549124717712404	0.04269733428955078	86596169483.87645	

Fig. 3. A comparison between our proposed numerical method and existing methods

The study utilized the SEIRD model to simulate the spread of the pandemic and applied five numerical methods, including the newly proposed SSH method. The SSH method proved to be the best overall, primarily because it strategically uses different numerical approaches for various components of the SEIRD model. This hybrid approach allows it to more effectively balance speed, accuracy, and memory efficiency compared to traditional methods.

In terms of execution speed, the SSH method significantly outperformed other methods thanks to adaptive time step selection and specific numerical strategies for individual components. With the explicit Euler method used for the Susceptible (S) and Dead (D) compartments, it is the fastest way of solving the problem where large-scale stability is not an issue; meanwhile, using others would enhance stability with a modest computation overhead concerning the classical RK4 higher-order methods for the Infected (I) and the Exposed (E) compartments. In terms of memory efficiency, the RK4 found itself optimally so. It executes an equivalent number of function calls per step, thus allowing direct access to memory in substantial amounts for large computations. Differently from it, the SSH was the most memory-consuming method; this was due to the need for additional memories to store intermediate values and corrections. The predictor-corrector formulation for the Infected (I) introduces additional computational steps, increasing memory usage.

The SSH emerges as the optimum numerical solver for high accuracy, recording the lowest Mean Squared Error (MSE). This can be attributed to its adaptive refinement that avoids gross numerical errors, thus being able to deal with changing periods of infections much more accurately. The predictor-corrector scheme for I, by preventing error accumulation, and semi-implicit updates for R and D, already luggage long-term stability. With this in mind, computed solutions could remain sufficiently close to real data.

The results are clearly showing the SSH method as the high one in the solution, providing a good trade-off between computation efficiency, memory efficiency, and numerical accuracy. The SSH is, however, a blend of various models such that each solution finds one basis at that point, contrary to those models that generally apply the same single numerical scheme. Whereas in memory effectiveness, RK4 surfaces best among the rest, the SSH duly provides the fastest computation time and high accuracy, making it quite practical in numerical modeling for the SEIRD models.

Conclusions

The SEIRD model successfully captured a revealing trend in the disease-spread behavior. The model mimics several epidemiological dynamics. The new numerical techniques unsustainably supported the efficacious solution of the model while engaging other inherent complexities of epidemiological modeling. These methods, particularly the hybrid SSH method,

increased both computational speed and accuracy, greatly enhancing the reliability of the model. Overall, this combination of advanced numerical techniques with the SEIRD model holds significant importance for the formulation and planning of a public

health response. This study stresses, therefore, the importance of post-school tailor-made and specialized numerical techniques for improvement in the predictive capabilities of the epidemiological models.

References

1. Zhang Y., Xiong J., Mao N. Epidemic model of Covid-19 with public health interventions consideration: a review. *Authorea*. Available at: <https://authorea.com/users/623464/articles/646186-epidemicmodel-of-covid-19-with-public-health-interventions-consideration-a-review2023> (accessed 11.06.2025). <https://doi.org/10.22541/au.168539048.84429551/v1>
2. Kermack W., McKendrick A. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. 1927;115(772):700–721. [https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118\(1927\)](https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118(1927))
3. Ahmad H.G., Eguda F.Y., Lawan B.M., Andrawus J., Babura B.I. Basic reproduction number and sensitivity analysis of Legionnaires' disease model. *Gadau Journal of Pure and Allied Sciences*. 2023;2(1):1–8.
4. Harrington W.N., Kackos C.M., Webby R.J. The evolution and future of influenza pandemic preparedness. *Experimental & Molecular Medicine*. 2021;53(5):737–749. <https://doi.org/10.1038/s12276-021-00603-0>
5. Al-Saei H.M., Hameed H.H. Mathematical modeling for COVID-19 pandemic in Iraq. *Journal of Interdisciplinary Mathematics*. 2021;24(5):1407–27.
6. Deeb M. Role of Mathematical Models in Epidemiology. *Tishreen University Journal-Basic Sciences Series*. 2018;40(1):1–13
7. Fraser C., Riley S., Anderson R.M., Ferguson N.M. Factors that make an infectious disease outbreak controllable. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014;101(16):6146–51.
8. Konstantinov I.S., Taha A.T.T. Mathematical analysis of SIR model with incubation period. *Research Result. Information Technologies*. 2024;9(3):3–9. <https://doi.org/10.18413/2518-1092-2024-9-3-0-1>.
9. Brauer F., Castillo-Chavez C., Feng Z. Mathematical Models in Epidemiology. In: *Texts in Applied Mathematics*. Vol. 69. Springer; 2019. 619 p.
10. Keeling M.J., Rohani P. Modeling Infectious Diseases in Humans and Animals: Past, Present, and Future. *Journal of Mathematical Biology*. 2018;77(1):1–15. <https://doi.org/10.1007/s00285-018-1235-6>
11. Youssef H.M., Alghamdi N.A., Ezzat M.A., El-Bary A.A., Shawky A.M. A new dynamical modeling SEIR with global analysis applied to the real data of spreading COVID-19

in Saudi Arabia. *Mathematical Biosciences and Engineering.* 2020;17(6):7018–7044.
<https://doi.org/10.3934/mbe.2020362>

12. Chapra S.C. *Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientists.* 4th ed. New York: McGraw-Hill; 2018. 697 p.
13. Schäfer M. *Epidemiological Modelling of the Spread and Transmission of Infectious Diseases.* Universität Koblenz; 2023. 256 p. (In German)
14. Zeb A., Khan M., Zaman G., Momani S., Ertürk V.S. Comparison of numerical methods of the SEIR epidemic model of fractional order. *Journal of Natural History A.* 2014;69(1–2):81–9. (In German)
15. Nitzsche C., Simm S. Agent-based modeling to estimate the impact of lockdown scenarios and events on a pandemic exemplified on SARS-CoV-2. *Scientific Reports.* 2024;14:13391. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63795-1>
16. Agha H.R., Taha A.T. Methods of the epidemics spread mathematical modeling. Research Result. *Information Technologies.* 2022;7(4):25–33. <https://doi.org/10.18413/2518-1092-2022-7-4-0-3>
17. Taha A.T.T. Modeling COVID-19 spreading protocol. *Information Systems and Technologies.* 2025;2(148):48–59.
18. Taha A.T.T., Konstantinov I.S. Analyzing pandemic dynamics through traveling waves: A mathematical model. *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(1):170–179. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-170-179>
19. Karimi R., Farrokhi M., Izadi N., et al. Basic Reproduction Number (R_0), Doubling Time, and Daily Growth Rate of the COVID-19 Epidemic: An Ecological Study. *Archives of Academic Emergency Medicine.* 2024;12(1):e66. <https://doi.org/10.22037/aaem.v12i1.2376>
20. Yousif R., Jarad F., Abdeljawad T., Awrejcewicz J. Fractional-Order SEIRD Model for Global COVID-19. *Mathematics.* 2023;11(4):1036. <https://doi.org/10.3390/math11041036>

Информация об авторах / Information about the Authors

Taha A. T. T., Postgraduate of the Department of Mathematical and Software of Information Systems, Belgorod National Research University, Belgorod, Russian Federation,
e-mail: 1591248@bsu.edu.ru

Таха Асраа Тарик Таха, аспирант кафедры математического и программного обеспечения информационных систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация,
e-mail: 1591248@bsu.edu.ru

Igor Sergeyevich Konstantinov,

Doctor of Sciences (Engineering), Professor
at the Institute of Information Technologies
and Control Systems, Belgorod State Technological
University named after V.G. Shukhov,
Belgorod, Russian Federation,
e-mail: konstantinovi@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-8903-4690

Игорь С. Константинов, доктор технических

наук, профессор института информационных
технологий и управляемых систем,
Белгородский государственный технологический
университет им. В. Г. Шухова,
г. Белгород, Российская Федерация,
e-mail: konstantinovi@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-8903-4690

Mamatov Alexander Vasilievich,

Doctor of Sciences (Engineering), Associate
Professor, Head of the Department of Information
Technologies, Belgorod State Technological
University named after V.G. Shukhov,
Belgorod, Russian Federation
e-mail: it@bstu.ru,
ORCID: 0009-0008-4063-213X

Александр В. Маматов, доктор технических

наук, доцент, заведующий кафедрой
информационных технологий, Белгородский
государственный технологический
университет им. В. Г. Шухова,
г. Белгород, Российская Федерация,
e-mail: it@bstu.ru,
ORCID: 0009-0008-4063-213X

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-232-244>



УДК 621.391.26

Прогнозирование ишемической болезни сердца на основе гибридных нечетких правил принятия решений

С. Н. Родионова¹, С. А. Филист¹, К. В. Разумова¹✉, О. М. Азалиева¹

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

✉ e-mail: myelectronworld@mail.ru

Резюме

Целью исследования является появление качества прогнозирования ишемической болезни сердца за счет использования в моделях принятия решений вместе с набором общепринятых факторов риска показателей, характеризующих работу защитных механизмов сердечно-сосудистой системы.

Методы. На предварительном этапе исследования в ходе проведенного разведочного анализа было установлено, что класс «высокий риск» появления ишемической болезни сердца по отношению к альтернативным классам имеет нечетко выраженные значительно пересекающиеся границы. В этих условиях специалисты, ориентированные на решение плохоформализуемых задач, рекомендуют использовать теорию нечеткой логики принятия решений, и в частности, методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил, разработанную в Юго-Западном государственном университете. На этом же этапе исследований был определен состав информативных признаков, в который вошли традиционно используемые в медицинской практике признаки, показатели степени ишемического поражения головного мозга и сердца, показатели, характеризующие функционирование антиоксидантной системы, энергетический разбаланс «сердечных» точек акупунктуры и характеристики уровня защиты сердечно-сосудистой системы.

Результаты. В работе получена математическая модель прогнозирования ишемической болезни сердца, использующая систему традиционных для медицинской практики предикторов в сочетании с блоками признаков, описывающими степень ишемического поражения сердца и головного мозга, функционирование антиоксидантной системы защиты, энергетический разбаланс БАТ, «связанных» с заболеванием сердца, и характеристики уровня защиты сердечно-сосудистой системы.

Заключение. Проведенные исследования показали, что для улучшения качества прогнозирования в соответствующих правилах целесообразно объединять следующее: предикторы традиционной медицины; показатели, характеризующие степень ишемического поражения головного мозга и сердца; показатели, характеризующие функционирование антиоксидантной системы; энергетический разбаланс «сердечных» точек акупунктуры характеристики уровня защиты ССС.

Было показано, что качество прогнозирования с использованием полученных в работе моделей увеличивается на 10–15% по сравнению с моделями, не использующими показатели уровня защиты организма.

Ключевые слова: прогнозирование; ишемическая болезнь сердца; функции уровня защиты; уровень защиты сердечно-сосудистой системы; нечеткие решающие правила; нечеткие модели принятия решений.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет 2030».

Для цитирования: Прогнозирование ишемической болезни сердца на основе гибридных нечетких правил принятия решений / С. Н. Родионова, С. А. Филист, К. В. Разумова, О. М. Азалиева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 3. С. 232–244. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-232-244>

Поступила в редакцию 05.07.2025

Подписана в печать 03.08.2025

Опубликована 30.09.2025

Prediction of ischemic heart disease based on hybrid fuzzy decision rules

Sergei N. Rodionova¹, Sofya A. Filist¹, Ksenia V. Razumova¹✉,
Oksana M. Azalieva¹

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

✉ e-mail: myelectronworld@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to improve the quality of predicting coronary heart disease by using decision-making models together with a set of generally accepted risk factors that characterize the functioning of the protective mechanisms of the cardiovascular system.

Methods. At the preliminary stage of the study, an exploratory analysis revealed that the "high risk" class of coronary heart disease has significantly overlapping boundaries in relation to alternative classes. In these conditions, specialists focused on solving poorly formalized problems recommend using the theory of fuzzy decision-making logic, and in particular, the methodology for synthesizing hybrid vague decision rules developed at Southwestern State University. At the same stage of the research, the composition of informative signs was determined, which included signs traditionally used in medical practice, indicators of the degree of ischemic damage to the brain and heart, indicators characterizing the functioning of the antioxidant system, the energy imbalance of the "cardiac" acupuncture points and characteristics of the level of protection of the cardiovascular system.

Results. The paper provides a mathematical model for predicting coronary artery disease using a system of traditional predictors for medical practice in combination with blocks of signs describing the degree of ischemic damage to the heart and brain, the functioning of the antioxidant defense system, the energy imbalance of BAT "associated" with heart disease, and the characteristics of the level of protection of the cardiovascular system.

Conclusion. The conducted studies have shown that in order to improve the quality of forecasting, it is advisable to combine the following in appropriate decisive rules: predictors of traditional medicine; indicators characterizing the degree of ischemic damage to the brain and heart; indicators characterizing the functioning of the antioxidant system; energy imbalance of "cardiac" acupuncture points; characteristics of the level of cardiovascular protection. It was shown that the quality of forecasting using the models obtained in the work increases by 10–15% compared with models that do not use indicators of the body's level of protection.

Keywords: prognosis; coronary heart disease; functions of the protection level; the protection level of the cardiovascular system; fuzzy decision rules; fuzzy decision-making models.

Funding: The work was carried out within the framework of the implementation of the development program of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Southwest State University" of the "Priority 2030" project.

Conflict of interest: The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

For citation: Rodionova S.N., Filist S.A., Razumova K.V., Azalieva O.M. Prediction of ischemic heart disease based on hybrid fuzzy decision rules. *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(3):232–244. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-232-244>

Received 05.07.2025

Accepted 03.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

Анализ отечественной и зарубежной литературы показывает, что, несмотря на несомненные достижения в области кардиологии, широко использующей современные информационные и интеллектуальные технологии, заболевания сердца и сосудов по сравнению с другими классами заболеваний являются наиболее частой причиной летальных исходов в России [1] и мире [2]. Причем значительная доля от этих смертей приходится на ишемическую болезнь сердца (ИБС) [3]. С учетом этого своевременное и качественное прогнозирование и обнаружение ранних стадий ИБС [4] с дальнейшей оптимизацией лечебно-диагностического процесса является актуальной задачей [5].

В профильной отечественной литературе выделяют немодифицируемые и модифицируемые факторы риска ИБС, рекомендуемые в качестве предикторов при оценке риска появления и развития исследуемой патологии [6], которые используются для построения соответствующих прогностических алгоритмов [3].

Анализ точности работы этих алгоритмов и отзывы практикующих специалистов позволяют сделать вывод о необходимости проведения дальнейших исследований [7] по повышению качества принятия решений по исследуемому классу заболеваний [8].

В ходе исследований, проведенных авторами на кафедре биомедицинской инженерии, было показано, что повышение качества прогнозирования ИБС может быть достигнуто, если в разрабатываемых моделях вместе с набором общепринятых факторов риска использовать показатели, характеризующие работу защитных механизмов сердечно-сосудистой системы при использовании методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП) [9].

Материалы и методы

Проведенный разведочный анализ структуры данных по факторам риска ИБС, используемых в традиционной медицине, и по показателям, характеризующим работу защитных механизмов сердечно-сосудистой системы и организма в целом, показал, что

прогнозируемый класс состояний (через выбранное время наблюдения пациент заболеет ИБС) с формальной точки зрения хорошо описывается в рамках технологии мягких вычислений, реализуемой с использованием МСГНРП, ориентированной на плохоформализуемые структуры данных [10]. В рамках выбранной методологии были получены различные варианты количественной оценки уровня защиты организма и его систем [11]: на основе методов, используемых в традиционной адаптологии [12], реализуемых в рамках выбранной методологии [13]; используя количественные показатели, характеризующие функциональный резерв [14] и функциональное состояние [15] организма [16] с ориентацией на технологию мягких вычислений [17], включая региональные ишемические процессы [18], в центральной гемодинамической системе [19], в отдельных органах [20] и сердце [8].

На первом этапе синтеза прогностического решающего правила в соответствии с общими рекомендациями МСГНРП с учетом выбранной нечеткой парадигмы определялся состав информативных признаков x_i ($i = 1, \dots, 12$), в состав которых в части общепринятых в медицине предикторов вошли: пол, возраст, наследственность, курение, алкоголь, ожирение, нерациональное питание, дислипидемия, гиподинамиия, артериальная гипертензия, нарушение углеводного обмена (сахарный диабет, гипергликемия), психосоциальные факторы.

На втором этапе синтеза определялась система функций принадлежности $\mu(x_i)$ к классу «высокая уверенность в риске появления и развития ИБС» (класс ω_i), которые агрегируются в частное решающее правило оценки уверенности UT_i в прогнозе по ИБС:

$$UT_i(i+1) = UT_i(i) + \\ + \mu_i(x_{i+1}) [1 - UT_i(i)]. \quad (1)$$

Использование формулы (1) предполагает, что для расчетов UT_i могут задействованы не все показатели. В этом случае уменьшается мера доверия $M\Delta_i$ к принимаемым решениям, которая определяется по формуле

$$M\Delta_i(j+1) = M\Delta_i(j) + \\ + P_{j+1}[1 - M\Delta_i(j)], \quad (2)$$

где P_{j+1} – уверенность в ω_i при наличии измеренного значения предиктора с идентификатором $j+1; j = 1, \dots, 11$.

Величины составляющих P_{j+1} определяются экспертами в соответствии с рекомендациями [9].

При наличии всех составляющих в модели (1) мера доверия к ней превышает величину 0,85.

При оценке меры доверия по средним значениям функций принадлежности её величина превышает величину 0,55.

Работами доктора А. Быкова было доказано, что ишемические процессы в сердце и сосудах, включая сосуды других органов, приобретают хроническую взаимоотягощающую связь [18]. Это позволяет сделать вывод о том, что

ишемию сердца и головного мозга следует рассматривать как существенный фактор риска для появления и развития ИБС. В работе [9] приводятся математические модели оценки степени тяжести ишемии головного мозга и нижних конечностей, по которым определяется частная уверенность в том, что у обследуемого прогнозируется появление и развитие ИБС UST_{II} .

Мера доверия к показателю UST_{II} определяется аналогично (2). По наибольшим значениям рисков мера доверия к показателю UST_{II} равна 0,58, а мера доверия по средним значениям функций принадлежности к классу ω_{II} равна 0,32.

В ходе исследований, проведенных на кафедре биомедицинской инженерии, была определена третья группа факторов риска в составе: перекисное окисление липидов (ПОЛ); антиоксидантная активность (АОА); энергетический разбаланс БАТ, «связанных» с заболеванием сердца (SRB) [11].

Уверенность в ω_{II} по третьей группе факторов риска определяется выражением

$$UD_{II} = \mu_{II}(Z) + \mu_{II}(SRB) - \mu_{II}(Z) \cdot \mu_{II}(SRB), \quad (3)$$

где $\mu_{II}(Z)$ и $\mu_{II}(SRB)$ – функции принадлежности к классу ω_{II} с базовыми переменными Z и SRB соответственно.

В свою очередь, переменная Z определяется выражением

$$Z = \delta x_{\Pi} - \delta x_A,$$

$$\text{где } \delta x_{\Pi} = \frac{x_{\Pi}^T - x_{\Pi}^H}{x_{\Pi}^H}; \quad \delta x_A = \frac{x_A^T - x_A^H}{x_A^H};$$

x_{Π}^H и x_A^H – ПОЛ и АОА, измеренное на репрезентативной группе здоровых людей; x_{Π}^T и x_A^T – ПОЛ и АОА у обследуемого пациента.

По наибольшим значениям рисков мера доверия к модели (3) превышает величину 0,61, а мера доверия по средним значениям функций принадлежности к классу ω_{II} превышает величину 0,34.

Финальная модель прогнозирования появления и развития ИБС описывается выражением вида

$$UF_{\text{ПИ}}(j+1) = UF_{\text{ПИ}}(j) + F_q[1 - UF_{\text{ПИ}}(j)], \quad (4)$$

где $UF_{\text{ПИ}}(1) = F_1 = UT_{II}$; $F_2 = UST_{II}$; $F_3 = UD_{II}$; $j = 1,2,3$; $q = 1,2,3$.

По наибольшим значениям рисков мера доверия к модели (4) превышает величину 0,97, а мера доверия по средним значениям функций принадлежности к классу $\omega_{\text{ПИС}}$ равна 0,8.

В работе [11] было показано, что для увеличения точности прогнозирования в синтезируемых моделях следует учитывать уровень защиты исследуемых органов и систем, определяемый через функции уровня защиты исследуемых органов и систем.

В ходе проведенных нами исследований было показано, что уровень защиты сердечно-сосудистой системы UZ_c целесообразно определять по индексу вегетативного равновесия (ИВР), определяющему соотношение парасимпатического и симпатического отделов

вегетативной нервной системы в регуляции сердечной деятельности и по показателю степени риска поражения сердечно-сосудистой системы SR , рассчитываемому по группе гемодинамических показателей [9].

ИВР определяется по формуле

$$ИВР = АМо/VAR, \quad (5)$$

где АМо – амплитуда моды для интервалов, которые соответствуют значению моды RR -интервалов; VAR – вариационный размах определяемый как разность между длительностью самого большого и самого маленького из RR -интервалов. Функция уровня защиты f_{zcc} (ИВР) характеризует уровень защиты ССС по каналам управления ритмом сердца со стороны ВНС.

Показатель SR определяется по группе гемодинамических показателей, в состав которых входят: амплитуда Т-зубца – X_1 ; смещение сегмента ST относительно изолинии – X_2 ; концентрация креатинфосфокиназы – X_3 ; концентрация тропанина Т – X_4 . Для оценки степени риска патологии ССС в работе [9] был получен набор нормирующих функций вида:

$$f_c(X_1) = \begin{cases} 0,06, & \text{если } X_1 < 0,3, \\ -0,02X_1, & \text{если } -3 \leq X_1 < 0,3, \\ 0, & \text{если } 0 \leq X_1 < 3, \\ 0,05X_1, & \text{если } 3 \leq X_1 < 6, \\ 0,15, & \text{если } X_1 \geq 6, \end{cases}$$

$$f_c(X_2) = \begin{cases} 0,19, & \text{если } X_2 < -2, \\ -0,095X_2, & \text{если } -2 \leq X_2 < 0, \\ 0,125X_2, & \text{если } 0 \leq X_2 < 2, \\ 0,25, & \text{если } X_2 \geq 2, \end{cases}$$

$$f_c(X_3) = \begin{cases} 0, & \text{если } X_3 < 180, \\ 0,0009X_3 - 0,16, & \text{если } 180 \leq X_3 < 400, \\ 0,25, & \text{если } X_3 \geq 400, \end{cases}$$

$$f_c(X_4) = \begin{cases} 0,5X_4, & \text{если } 0 \leq X_4 < 0,5, \\ 0,25, & \text{если } X_4 \geq 0,5. \end{cases}$$

Степень риска появления и развития заболеваний ССС определяется итерационной формулой вида:

$$SR(i+1) = SR(i) + f_c(X_{i+1})[1 - SR(i)], \quad (6)$$

где $SR(1) = f_c(X_1)$.

Функция уровня защиты $f_{zcc}(SR)$ характеризует уровень защиты сердца по внутренним контурам ее функционирования.

При выборе агрегатора функций уровня защиты ССС для решения задачи прогнозирования ИБС эксперты, руководствуясь рекомендациями [9], выбрали модель вида

$$UZIN_{ИБС} = (0,9 f_{zsc}(SR) + 0,6 f_{zsc}(\text{ИВР}))/2,5. \quad (7)$$

По наибольшим значениям рисков мера доверия к модели (7) превышает величину 0,99, а мера доверия по средним значениям функций принадлежности к классу ω_H превышает величину 0,67.

С учетом уровня защиты ССС с ориентацией на противодействие ИБС модель прогнозирования ишемической болезни сердца принимает вид

$$UPZ_{ИБС} = \begin{cases} UF_{ПИ} - UZIN_{ИБС}, & \text{если } UF_{ПИ} > UZIN_{ИБС}, \\ 0, & \text{если } UF_{ПИ} \leq UZIN_{ИБС}. \end{cases} \quad (8)$$

По наибольшим значениям рисков мера доверия к модели (8) превышает величину 0,99, а мера доверия по средним значениям функций принадлежности к классу ω_{II} превышает величину 0,93.

Результаты и их обсуждение

В рамках МСГНРП рекомендуется проводить трехуровневый контроль получаемых решающих правил.

На первом уровне производится экспертная оценка с определением мер доверия к исследуемым моделям для максимального и наиболее часто встречающегося набора информативных признаков.

На втором уровне эксперты формируют искусственные (модельные) контрольные выборки с объектами альтернативных классов, выбирая различные варианты мер их близости (близкие, средние и наиболее удаленные объекты). В ходе математического моделирования было установлено, что уверенность в правильной классификации для модели (8) находится на уровне 0,98.

Третий уровень контроля организуется традиционным для теории распознавания способом по репрезентативным контрольным выборкам по таким показателям качества, как диагностическая чувствительность (ДЧ) и специфичность (ДС), диагностическая эффективность (ДЭ), прогностическая значимость положительных и отрицательных результатов. В ходе пятилетнего

наблюдения за качеством работы прогностического решающего правила (8) было показано, что приемлемое качество прогноза обеспечивается не менее чем на трехлетнем периоде наблюдения. При этом если в модели (8) отсутствует составляющая $UZIN_{ИБС}$, все показатели качества принятия решений находятся в интервале 0,85–0,9, а при учете составляющей уровня защиты ССС превышает величину 0,97.

Полученные результаты трехуровневой проверки позволяют рекомендовать предложенные решающие правила для использования в практической медицине.

Выводы

Проведенные исследования показали, что для улучшения качества прогнозирования в соответствующих решающих правилах целесообразно объединять следующее: предикторы традиционной медицины; показатели, характеризующие степень ишемического поражения головного мозга и сердца; показатели, характеризующие функционирование антиоксидантной системы; энергетический разбаланс «сердечных» точек акупунктуры характеристики уровня защиты ССС.

Проведенная оценка качества принимаемых решений с использованием методов экспертного оценивания, математического моделирования и статистического анализа показала, что

полученные гибридные нечеткие модели обеспечивают приемлемое качество прогнозирования появления и развития ИБС, а включение в состав решающих правил показателя уровня защиты ССС повышает качество принимаемых решений на 10–15% процентов в

зависимости от количества и качества собираемой информации по сравнению с моделями, не использующими показатели уровня защиты, что позволяет рекомендовать полученные результаты к практическому использованию в системе здравоохранения.

Список литературы

1. Толпигина С. Н., Марцевич С. Ю. Исследование ПРОГНОЗ ИБС. Новые данные по отдаленному наблюдению // Профилактическая медицина. 2016. Т. 19, № 1. С. 30–36. <https://doi.org/10.17116/profmed201619130-36>
2. Оценка кардиоваскулярного риска у работников нефтехимических производств и разработка программы профилактики сердечно-сосудистых заболеваний / Л. К. Кариимова, З. Ф. Гимаева, Р. Р. Галимова, Н. А. Мулдашева, Д. Х. Калимуллина, Л. Н. Маврина, Е. Р. Абдрахманова // Гигиена и санитария. 2019. Т. 98, № 9. С. 978–983. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-9-978-983>
3. Роль эпигенетических факторов в развитии и диагностике ишемической болезни сердца / А. Р. Садыкова, А. Р. Сафиуллина, К. Р. Нуриахметова [и др.] // Вестник современной клинической медицины. 2023. Т. 16, № 6. С. 123–129. [https://doi.org/10.20969/VSKM.2023.16\(6\).123-129](https://doi.org/10.20969/VSKM.2023.16(6).123-129)
4. Кардиоваскулярная профилактика 2017. Российские национальные рекомендации / С. А. Бойцов, Н. В. Погосова, М. Г. Бубнова [и др.] // Российский кардиологический журнал. 2018. № 6. С. 7–122.
5. Бойцов С. А., Проваторов С. И. Сердечно-сосудистые заболевания в Российской Федерации: основные составляющие смертности и направления профилактики // Вестник Росздравнадзора. 2018. № 5. С. 12–8.
6. Основы ранней диагностики и прогнозирования ишемической болезни сердца / О. А. Ефремова, Л. А. Камышникова, В. М. Никитин, Е. А. Железнова // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Медицина. Фармация. 2013. № 18(161), вып. 23. С. 33–36.
7. Барбараши О. Л. Стабильная ишемическая болезнь сердца. Клинические рекомендации // Российский кардиологический журнал. 2020. Т. 22, № 11. С. 201–250.
8. Прогнозирование появления и развития ишемической болезни сердца у инженерно-технического персонала на основе нечетких гибридных моделей / Н. А. Кореневский,

Р. И. Сафонов, С. Н. Родионова, Н. А. Милостная, К. В. Разумова // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2024. Т. 23, № 4. С. 148–157.

9. Бокерия Л. А., Быков А. В., Кореневский Н. А. Оптимизация ведения пациентов с мультицентричным ишемическим поражением на базе нечетких интеллектуальных технологий: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 400 с.

10. Сафонов Р. И., Стародубцева Л. В., Крикунова Е. В. Перспективы применения мягких вычислений и информационных технологий в профпатологии: монография. Курск: Издательство Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2018. 232 с.

11. Методы количественной оценки защитных механизмов организма на различных его уровнях на основе гибридных нечетких моделей и их использование в задачах прогнозирования и медицинской диагностики / Н. А. Кореневский, С. Н. Родионова, Е. В. Крикунова, Р. И. Сафонов, В. А. Белозеров // Медицинская техника. 2022. № 3(333). С. 24–27.

12. Анализ когнитивных функций и нейрофизиологических процессов при адаптации человека к условиям арктики / Е. П. Муртазина, И. И. Коробейникова, Л. В. Поскотинова, Н. А. Каратыгин, С. С. Перцов // Российский медико-биологический вестник имени академика И. П. Павлова. 2023. Т. 31, № 2. С. 293–304. <https://doi.org/10.17816/PAVLOVJ109581>

13. Сафонов Р. И. Синтез нечетких моделей оценки влияния производственной среды на состояние здоровья работников по факторам трудовой адаптации // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2023. Т. 22, № 3. С. 89–98.

14. Курзанов А. Н., Заболотских Н. В., Ковалев Д. В. Функциональные резервы организма: монография. М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2016. 96 с.

15. Оценка защитных функций организма и его систем по показателям функционального состояния и функционального резерва / Н. А. Кореневский, С. Н. Родионова, К. В. Разумова, О. Ю. Лукаш // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2023. Т. 22, № 3. С. 67–77.

16. Совершенствование оценки функциональных резервов организма – приоритетное направление развития донозологической диагностики преморбидных состояний / А. Н. Курзанов, А. Н. Заболотских, Д. В. Ковалев, Д. А. Бузиашвили // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 10, ч. 1. С. 67–70.

17. Бойцова Е. А., Шуткин А. Н., Магеровский М. А. Оценка уровня функциональных резервов организма на основе технологий мягких вычислений и модели Г. Раша //

Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2017. Т. 14, № 3. С. 577–584.

18. Быков А. В. Использование технологии мягких вычислений для оценки степени тяжести региональных ишемических процессов // Системный анализ и управление в биотехнических системах. 2017. Т. 16, № 4. С. 916–926.
19. Быков А. В. Метод и нечеткая модель оценки степени тяжести ишемической болезни центральной гемодинамической системы // Вестник новых медицинских технологий. 2017. Т. 24, № 4. С. 144–150.
20. Быков А. В., Устинов А. Г., Хрипина И. И. Модель прогнозирования возникновения осложнений ишемии нижних конечностей путём оценки функционального резерва организма // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. № 4 (17). С. 81–88.

References

1. Tolpygina S.N., Martsevich S.Yu. Study PROGNOSIS OF IHD. New data on remote observation. *Profilakticheskaya meditsina = Preventive Medicine*. 2016;19(1):30–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.17116/profmed201619130-36>
2. Karimova L.K., Gimayeva Z.F., Galimova R.R., Muldasheva N.A., Kalimullina D.Kh., Mavrina L.N., Abdurakhmanova E.R. Assessment of cardiovascular risk in workers of petrochemical industries and development of a program for the prevention of cardiovascular diseases. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*. 2019;98(9):978–983. (In Russ.) <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-9-978-983>
3. Sadykova A.R., Safiullina A.R., Nuriakhmetova K.R., et al. The role of epigenetic factors in the development and diagnosis of coronary heart disease. *Vestnik sovremennoi klinicheskoi meditsiny = Bulletin of Modern Clinical Medicine*. 2023;16(6):123–129. (In Russ.) [https://doi.org/10.20969/VSKM.2023.16\(6\).123-129](https://doi.org/10.20969/VSKM.2023.16(6).123-129)
4. Boytsov S.A., Pogosova N.V., Bubnova M.G., et al. Cardiovascular prevention 2017. Russian national recommendations. *Rossiiskii kardiologicheskii zhurnal = Russian Journal of Cardiology*. 2018;(6):7–122. (In Russ.)
5. Boytsov S.A., Provorov S.I. Cardiovascular diseases in the Russian Federation: main components of mortality and areas of prevention. *Vestnik Roszdravnadzora = Bulletin of Roszdravnadzor*. 2018;(5):12–8. (In Russ.)
6. Fundamentals of early diagnosis and prognosis of coronary heart disease / O.A. Efremova, L.A. Kamyshnikova, V.M. Nikitin, E.A. Zhelezova. *Nauchnye vedomosti*

Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Meditsina. Farmatsiya = Scientific Bulletin of Belgorod State University. Series: Medicine. Navigation. 2013;18(161):33–36. (In Russ.)

7. Barbarash O.L. Stable coronary heart disease. Clinical guidelines. *Rossiiskii kardiologicheskii zhurnal = Russian Journal of Cardiology.* 2020;22(11):201–250. (In Russ.)

8. Korenevsky N.A., Safronov R.I., Rodionova S.N., Milostnaya N.A., Razumova K.V. Forecasting the occurrence and development of ischemic heart disease in engineering and technical personnel based on fuzzy hybrid models. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = Systems Analysis and Control in Biomedical Systems.* 2024;23(4):148–157. (In Russ.)

9. Bokeria L.A., Bykov A.V., Korenevsky N.A. Optimization of patient management with multicentric ischemic lesions based on fuzzy intelligent technologies. Staryi Oskol: TNT; 2019. 400 p. (In Russ.)

10. Safronov R.I., Starodubtseva L.V., Krikunova E.V. Prospects for the use of soft computing and information technologies in occupational pathology. *Kursk: Izdatel'stvo Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii;* 2018. 232 p. (In Russ.)

11. Korenevsky N.A., Rodionova S.N., Krikunova E.V., Safronov R.I., Belozerov V.A. Methods for quantitative assessment of the body's defense mechanisms at its various levels based on hybrid fuzzy models and their use in forecasting and medical diagnostics. *Meditsinskaya tekhnika = Medical Equipment.* 2022;3(333):24–27. (In Russ.)

12. Murtazina E.P., Korobaynikova I.I., Poskotinova L.V., Karatygin N.A., Pertsov S.S. Analysis of cognitive functions and neurophysiological processes in human adaptation to Arctic conditions. *Rossiiskii mediko-biologicheskii vestnik imeni akademika I. P. Pavlova = Russian Medical and Biological Bulletin named after Academician I.P. Pavlov.* 2023;31(2):293–304. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/PAVLOVJ109581>

13. Safronov R.I. Synthesis of fuzzy models for assessing the impact of the production environment on the health of workers based on labor adaptation factors. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = Systems Analysis and Management in Biomedical Systems.* 2023;22(3):89–98. (In Russ.)

14. Kurzanov A.N., Zabolotskikh N.V., Kovalev D.V. Functional reserves of the body. Moscow: Izdatel'skii dom Akademii Estestvoznanii; 2016. 96 p. (In Russ.)

15. Korenevsky N.A., Rodionova S.N., Razumova K.V., Lukash O.Y. Evaluation of the protective functions of the body and its systems by indicators of functional state and functional reserve. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = Systems Analysis and Management in Biomedical Systems.* 2023; 22(3):67–77 (In Russ.)

16. Kurzanov A.N., Zabolotskikh A.N., Kovalev D.V., Buziashvili D.A. Improving the assessment of the body's functional reserves is a priority area for the development of preclinical diagnostics of premorbid conditions. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya = International Journal of Experimental Education.* 2015;(10):67–70. (In Russ.)
17. Boytsova E.A., Shutkin A.N., Magerovsky M.A. Assessment of the level of functional reserves of the body based on soft computing technologies and the model of G. Rasch. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = Systems Analysis and Management in Biomedical Systems.* 2017;14(3):577–584. (In Russ.)
18. Bykov A.V. Using soft computing technology to assess the severity of regional ischemic processes. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biotekhnicheskikh sistemakh = Systems Analysis and Management in Biomedical Systems.* 2017;16(4):916–926 (In Russ.)
19. Bykov A.V. Method and fuzzy model for assessing the severity of ischemic disease of the central hemodynamic system. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii = Bulletin of New Medical Technologies.* 2017;24(4):144–150. (In Russ.)
20. Bykov A.V., Ustinov A.G., Khripina I.I. Model for predicting the occurrence of complications of lower limb ischemia by assessing the functional reserve of the body. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoе priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2015;4(17):81–88. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Родионова Софья Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: knsofia@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4477-3975

Sofya N. Rodionova, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: knsofia@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4477-3975

Филист Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sfilist@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1358-671X

Sergei A. Filist, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sfilist@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1358-671X

Разумова Ксения Викторовна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: myelectronworld@mail.ru, ORCID: 0009-0007-7942-8083

Азалиева Оксана Михайловна, директор центра медицинской профилактики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: oksana.m.vorobyeva@yandex.ru

Ksenia V. Razumova, Candidate of Sciences (Engineering), Senior Lecturer of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: myelectronworld@mail.ru, ORCID: 0009-0007-7942-8083

Oksana M. Azalieva, Director of the Center for Medical Prevention, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: oksana.m.vorobyeva@yandex.ru

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/>.