

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

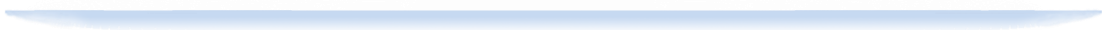
Известия

**Юго-Западного
государственного университета**

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

Научный журнал

Том 13 № 4 / 2023



Proceedings

**of the Southwest
State University**

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

Scientific Journal

Vol. 13 № 4 / 2023



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

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)

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

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

Корневский 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, 2023



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

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 22.12.2023. Формат 60×84/8.

Дата выхода в свет 29.12.2023.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 22,4.

Тираж 1000 экз. Заказ 75.

16+



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).

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)

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

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

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

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

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

16+

© Southwest State University, 2023



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

Signed for printing 22.12.2023. Format 60×84/8.

Release date 29.12.2023.

Offset paper. Printer's sheets: 22,4.

Circulation 1000 copies. Order 75.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ	8
<i>Оригинальные статьи</i>	
Выбор архитектуры нейронной сети для реализации когнитивных функций сетевого программного обеспечения управления группировкой взаимодействующих малых космических аппаратов.....	8
<i>Шиленков Е. А., Фролов С. Н., Титенко Е. А., Мирошниченко С. Ю.</i>	
Гибридный нейронечеткий классификатор для мониторинга эффективности лечения заболеваний системы дыхания с учетом коморбидности.....	27
<i>Петрунина Е. В., Филист С. А., Шульга Л. В., Песок В., Хайдер А. Х. Алаеси, Бутусов А. В.</i>	
МЕХАТРОНИКА, РОБОТОТЕХНИКА.....	54
<i>Оригинальные статьи</i>	
Подготовка специалистов по радиационному виду неразрушающего контроля с применением цифровых технологий	54
<i>Кувшинников В. С., Ковшов Е. Е.</i>	
Система сбора и оценки нагрузочной информации о биоэлектрических сигналах мышечного аппарата стопы человека с ДЦП	70
<i>Яцун С. М., Рукавицын А. Н., Политов Е. Н.</i>	
РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ	84
<i>Оригинальные статьи</i>	
Анализ размеров частиц нанопорошков с использованием нейронных сетей и электронной микроскопии	84
<i>Томакова Р. А., Псарев Д. В., Неручев Ю. А., Старков В. А.</i>	
Методика диагностики глаукомы по снимкам глазного дна человека.....	99
<i>Комкова С. В.</i>	
Метод и алгоритм реализации множества Мандельброта для обработки сложноструктурируемых изображений.....	115
<i>Томакова Р. А., Ахмадулин И. М., Нефедов Н. Г., Пузырев Е. И., Малышев А. А.</i>	
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ.....	131
<i>Оригинальные статьи</i>	
Метод формирования линейных шкал оценки результатов обучения с контролем адекватности индикаторных переменных	131
<i>Маслак А. А., Коробко А. И.</i>	
Технологии биоимпедансной спектроскопии в системах поддержки принятия решений при диагностике социально значимых заболеваний	148
<i>Шаталова О. В., Стадниченко Н. С., Ефремов М. А., Башмакова И. А., Лях А. В., Серебровский А. В.</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	175
<i>Оригинальные статьи</i>	
Метод оценки уровня неспецифической защиты организма человека по показателям, характеризующим процессы адаптации	175
<i>Родионова С. Н.</i>	
К сведению авторов.....	193

CONTENT

INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS	8
<i>Original articles</i>	
Selection of a Neural Network Architecture for Implementation of Cognitive Functions of Network Software for Control of a Group of Interacting Small Space Vehicles	8
<i>Shilenkov E. A., Frolov S. N., Titenko E. A., Miroshnichenko S. Yu.</i>	
Hybrid Neuro-Fuzzy Classifier for Monitoring the Effectiveness of Treatment of Diseases of the Respiratory System, Taking into Account Comorbidity	27
<i>Petrulina E. V., Filist S. A., Shulga L. V., Pesok V., Hayder A. H. Alawsi, Butusov A. V.</i>	
MECHATRONICS, ROBOTICS	54
<i>Original articles</i>	
Specialists Training for the Radiation Type of Non-Destructive Testing Based on Digital Technologies	54
<i>Kuvshinnikov V. S., Kovshov E. E.</i>	
A System for Collecting and Evaluating Load Information about Bioelectric Signals of the Muscular Apparatus of the Foot of a Person with Cerebral Palsy	70
<i>Yatsun S. M., Rukavitsyn A. N., Polotov E. N.</i>	
SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING	84
<i>Original articles</i>	
Particle Size Analysis of Nanopowders Using Neural Networks and Electron Microscopy	84
<i>Tomakova R. A., Psarev D. V., Neruchev Y. A., Starkov V. A.</i>	
Method of Diagnosis of Glaucoma Based on Human Fundus Images	99
<i>Komkova S. V.</i>	
A Method and Algorithm for Implementing the Mandelbrot Set for Processing Complex Structured Images	115
<i>Tomakova R. A., Akhmadulin I. M., Nefedov N. G., Puzyrev E. I., Malyshev A. A.</i>	
SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING	131
<i>Original articles</i>	
Method for Forming Linear Scales for Assessing Learning Outcomes with Control of the Adequacy of Indicator Variables	131
<i>Maslak A. A., Korobko A. I.</i>	
Technologies of Bioimpedance Spectroscopy in Decision Support Systems for the Diagnosis of Socially Significant Diseases	148
<i>Shatalova O. V., Stadnichenko N. S., Efremov M. A., Bashmakova I. A., Lyakh A. V., Serebrovsky A. V.</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	175
<i>Original articles</i>	
A Method for Assessing the Level of Nonspecific Protection of the Human Body by Indicators Characterizing the Processes of Adaptation	175
<i>Rodionova S. N.</i>	
Information for Authors	193

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-8-26>



УДК 004.8.032.26

Выбор архитектуры нейронной сети для реализации когнитивных функций сетевого программного обеспечения управления группировкой взаимодействующих малых космических аппаратов

Е. А. Шиленков¹, С. Н. Фролов¹, Е. А. Титенко¹ ✉, С. Ю. Мирошниченко¹

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

✉ e-mail: johntit@mail.ru

Резюме

Целью исследования является обоснование и выбор архитектуры нейронной сети для возможности реализации когнитивных функций сетевого программного обеспечения управления группировкой взаимодействующих малых космических аппаратов.

Методы основаны на понятиях теории ИИ для управления группировкой МКА – использование адаптивных методов и средств, позволяющих принимать решения, аналогично механизмам мышления человека. Применительно к системам космической связи с гетерогенной структурой методы и технологии ИИ направлены на процессы прогнозирования состояния в каналах связи между узлами сети и автоматической реконфигурации сети аппаратов на основе процессов обучения нейронной сети (НС).

Результаты. В режиме обучения и прогнозирования необходимо использовать временные ряды параметров и координат конкретных пар МКА, обладающих ненулевой прямой видимостью. Специально для анализа временных рядов применяются рекуррентные нейронные сети (RNN), в частности LSTM. Идея работы RNN состоит в использовании в качестве входных данных для текущего прогноза не только векторов состояния МКА и их координат, но и предыдущего значения качества связи, фактического или прогнозного. В работе показано, что бортовые вычислительные мощности отдельного МКА не позволяют выполнять прогнозирование и обучение на борту. Следовательно, требуется выделенный наземный сегмент прогнозирования и мониторинга, который будет собирать апостериорную информацию, периодически выполнять обучение когнитивной модели, использовать ее для прогнозирования качества связи и передавать результаты узлам сети для построения маршрутов передачи данных.

Закключение. Анализ современных решений и выбор архитектуры нейронной сети для реализации когнитивных функций сетевого программного обеспечения управления группировкой взаимодействующих малых космических аппаратов показал, что наиболее полно требованиям проекта отвечают нейронные сети архитектуры Transformer, которые основаны на механизме внутреннего внимания. Архитектура Transformer позволяет использовать всю полноту априорных данных, обладает высокой скоростью обучения и прогнозирования.

Ключевые слова: группировка МКА; сетевое программное обеспечение; архитектура нейронной сети; рекуррентные нейронные сети; LSTM.

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

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

Поступила в редакцию 02.10.2023

Подписана в печать 01.11.2023

Опубликована 22.12.2023

Selection of a Neural Network Architecture for Implementation of Cognitive Functions of Network Software for Control of a Group of Interacting Small Space Vehicles

Egor A. Shilenkov¹, Sergey N. Frolov¹, Evgeniy A. Titenko¹ ✉,
Sergey Yu. Miroshnichenko¹

¹ Southwest State University

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

✉ e-mail: johntit@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to substantiate and select the architecture of a neural network for the possibility of implementing the cognitive functions of network software for controlling a grouping of interacting small spacecraft.

Methods are based on the concepts of AI theory for managing the grouping of small spacecraft - the use of adaptive methods and tools that allow making decisions, similar to the mechanisms of human thinking. With regard to space communication systems with a heterogeneous structure, AI methods and technologies are aimed at the processes of predicting the state in communication channels between network nodes and automatic reconfiguration of the network of devices based on the learning processes of a neural network (NN).

Results. In the learning and forecasting mode, it is necessary to use time series of parameters and coordinates of specific pairs of small spacecraft with non-zero line of sight. Especially for time series analysis, recurrent neural networks (RNN) are used, in particular, LSTM. The idea of RNN operation is to use as input data for the current forecast not only the state vectors of the SVs and their coordinates, but also the previous value of the communication quality, actual or predictive. The paper shows that the onboard computing power of a separate MSC does not allow performing forecasting and training on board. Therefore, a dedicated ground segment of forecasting and monitoring is required, which will collect a posteriori information, periodically train the cognitive model, use it to predict the quality of communication, and transmit the results to the network nodes to build data transmission routes.

Conclusion. The analysis of modern solutions and the choice of neural network architecture for the implementation of the cognitive functions of the network software for controlling the grouping of interacting small spacecraft showed that the neural networks of the Transformer architecture, which are based on the mechanism of internal attention, most fully meet the requirements of the project. The Transformer architecture allows using the entirety of a priori data, has a high learning and forecasting speed.

Keywords: MCA grouping; network software; neural network architecture; recurrent neural networks; LSTM.

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

For citation: Shilenkov E. A., Frolov S. N., Titenko E. A., Miroshnichenko S. Yu. Selection of a Neural Network Architecture for Implementation of Cognitive Functions of Network Software for Control of a Group of Interacting Small Space Vehicles. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(4): 8–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-8-26>.

Received 02.10.2023

Accepted 01.11.2023

Published 22.12.2023

Введение

Методы управления существующими группировками малых космических аппаратов (МКА) достаточно полно исследованы и описаны в отечественной и зарубежной литературе и условно делятся на методы маршрутизации без балансировки нагрузки в сети и с балансировкой нагрузки в сети [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15]. Первый класс методов обеспечивает поиск оптимального (как правило одного) маршрута с учетом заданных требований. Реализация этих методов не поддерживает динамичное изменение числа МКА в группировке, хотя алгоритмически является достаточно простым. Оно подходит для сетей приемо-передающих элементов с неизменяемым составом – наземные стационарные абонентские станции. Для группировок космических аппаратов различных классов такая маршрутизация требует модификации и возможности перестройки маршрута на различное количество элементов. Методы маршрутизации с балансировкой нагрузки в сети предполагают нахождение допустимого множества маршрутов для всех пар источник-приемник и управление потока данных по ним по заданному критерию (например, критерий

максимальной производительности или отказоустойчивости сети передачи данных). Зачастую данные методы базируются на использовании технологии искусственного интеллекта (ИИ).

Материалы и методы

Отличительная особенность применения средств и технологий ИИ для управления группировкой МКА – введение в контуры управления, принятия решений адаптивных методов и средств, позволяющих принимать решения, аналогично механизмам мышления человека. Применительно к системам космической связи с гетерогенной структурой методы и технологии ИИ направлены на процессы прогнозирования состояния в каналах связи между узлами сети и автоматической реконфигурации сети аппаратов на основе процессов обучения нейронной сети (НС). Такое ПО позволит децентрализованно управлять структурой сети при ее переменном составе.

Когнитивные функции сетевого ПО заключаются в способности использовать исторические данные для решения задач прогнозирования и управления с целью поддержания устойчивого функционирования сети и минимизации потерь при передаче данных.

Задачи прогнозирования включают:

- прогнозирование технического состояния отдельных МКА (узлов сети) и оценки времени их функционирования в качестве узлов сети;

- прогнозирование качества связи между парами МКА при условии наличия взаимной видимости.

На основе прогноза технического состояния МКА и качества связи между парами МКА возможна выдача рекомендаций по досрочному:

- добавлению или исключению МКА из состава сети;

- поддержанию актуальной матрицы сети с учетом взаимного пространственного расположения ее узлов и их направлений движения;

- планированию и динамическому перестроению маршрутов передачи данных между МКА.

Задача прогнозирования технического состояния МКА неразрывно связана с его аппаратной платформой, которая для разных производителей и моделей МКА кардинально различается и описывается переменным количеством параметров различной физической природы. Разрабатываемое сетевое ПО должно быть максимально абстрагировано от аппаратных особенностей каждого конкретного МКА, чтобы обеспечить функционирование сети в условиях разнообразия структурно-функциональной организации аппаратов и систем [16; 17; 18].

Особенности работы МКА в космическом пространстве заключаются при отсутствии ремонтно-регламентных

работ, технического обслуживания, доставки и использования типовых элементов замены блоков и узлов аппаратов. Будучи выведенными на орбиту МКА функционируют в рамках отведенного временного срока и работоспособности основных подсистем. Вместе с тем некоторая обобщенная информация о состоянии МКА необходима для оценки времени их устойчивого функционирования в качестве узлов сети и для прогнозирования качества связи между парами МКА в пределах прямой видимости. В данном качестве может использоваться скалярное значение работоспособности, описывающее оставшийся ресурс МКА на текущий момент (рассчитывается с помощью локального ПО на борту МКА и передается в сетевое ПО) или компактный вектор значений «типовых» параметров МКА: напряжение солнечных батарей, напряжение на выходе аккумулятора, соотношение сигнал-шум приемопередатчика, температура на борту, частота вращения аппарата при движении по орбите. В составе системы команд сетевого ПО целесообразно иметь специализированную функцию Age (ID, UTC), которая будет обеспечивать НС необходимой информацией для составления прогнозов работоспособности аппаратов. В отличие от скалярной оценки состояния МКА вектор «типовых» параметров МКА дает больше дополнительной информации для составления прогноза НС, что позволяет немотонно учитывать множественные отклонения параметров.

При этом задача прогнозирования времени функционирования каждого конкретного МКА не является критически необходимой в силу того, что подобные события во временном масштабе сети редки (ресурс МКА в среднем составляет не менее 6 месяцев) и достоверно определяются фактическим отсутствием связи с другими МКА в течение нескольких суток.

Задача прогнозирования качества связи между парами МКА при условии наличия взаимной видимости является наиболее нетривиальной и многофакторной прогностической задачей. Прямая видимость между парой МКА, которая рассчитывается аналитически на основе имеющихся трехмерных геодезических координат, определяемых по орбитальным параметрам, отнюдь не является гарантией наличия связи и тем более не позволяет напрямую спрогнозировать ее качество. На качество связи помимо прямой видимости влияют следующие факторы:

- неудачная ориентация МКА в пространстве;
- состояние аппаратной платформы каждого из МКА (бортовая энергетика, ресурс оборудования);
- характеристики приемо-передающих устройств (тип антенны, мощность передатчика и др.);
- наличие естественных и искусственных помех.

Все эти факторы не имеют регулярной структуры и аналитических закономерностей, что значительно усложняет

расчетно-логический подход прогнозирования качества связи. Применение вероятностного подхода также видится малоперспективным, так как эффективное применение вероятностных моделей возможно при уменьшении количества учитываемых факторов и упрощения сложности модели с одновременной потерей качества прогнозирования.

С учетом этого наиболее перспективным вариантом следует считать добавление в сетевое ПО когнитивных возможностей анализа и выявления зависимостей в фактических (исторических) данных о взаимном положении МКА, состоянии их аппаратной платформы и соответствующем качестве связи. Среди известных подходов (логические, продукционные, фреймовые модели знаний, аппарат генетических алгоритмов, нейронные сети) аппарат прогностических нейронной сети видится наилучшим решением, так как он достаточно инвариантен к объему входных данных, позволяет за счет внутренней структуры НС описывать сложные нелинейные закономерности между факторами. Вариант построения прогностической нейросетевой модели видится наилучшим решением.

Прогноз на добавление или исключение МКА из состава сети включает две основные составляющие:

- 1) актуализация информации о состоянии МКА (вершинах графа сети);
- 2) актуализация наличия и качества связи между МКА (ребер графа сети и их весов).

Ориентировочная частота актуализация информации о состоянии вершин сети зависит от количества действующих МКА, графика запуска новых, но в любом случае не чаще, чем 1 раз в 12 часов. При наличии уникальных идентификаторов МКА задача добавления новых вершин в граф сети является тривиальной. Процесс исключения МКА представляется немного более сложным, однако также имеет классическое алгоритмическое решение на основе сопоставления «окон» прямой видимости (рассчитываются на основе орбитальных параметров) с фактическим наличием и качеством связи. В составе метаправил реконфигурации сети, если МКА недоступен в течение периода времени (2-3 дня), он должен быть принудительно исключен из состава сети, а его идентификатор освобожден для новых подключений, если же МКА периодически в течение периода времени подает сигналы к подключению, то такой аппарат следует считать отложенным к добавлению в сеть, его идентификатор сохраняется.

Поддержание актуальной карты сети с учетом взаимного пространственного расположения ее узлов представляется более динамичной во времени задачей. Обновление ребер графа сети должно выполняться значительно чаще по сравнению с обновлением вершин – один раз в 1–10 мин. Необходимость обновления также рассчитывается аналитически по орбитальным параметрам МКА, которая позволяет определить

вход или выход из зоны прямой видимости для любой пары аппаратов. Сеть при этом должна работать в комбинированном режиме, сочетая реактивное и проактивное функционирование для актуализации показателей фактического качества связи для пар МКА, имеющих взаимную прямую видимость. Использование интеллектуальных алгоритмов для актуализации фактического качества связей видится избыточным и нерациональным.

Рассмотрим *планирование и динамическое перестроение маршрутов передачи данных между МКА*. Топология сети МКА представляет собой нерегулярно связанный граф с постоянно изменяющимися весами дуг, поэтому построенный маршрут передачи данных между парой МКА (равно как и несколько альтернативных маршрутов) достаточно быстро теряет актуальность (в среднем в течение 10 мин), что приводит к разрыву связи и необходимости перестроения маршрута. При перестроении по факту разрыва отсутствует возможность установления долгоживущих стабильных каналов со средним временем доступности не менее 99% (единственный вариант – поддержание нескольких альтернативных маршрутов и отдельное перестроение каждого из них при фактической недоступности, однако такой вариант дает чрезмерную нагрузку на сеть МКА, усложняет балансировку и снижает пропускную способность кратно количеству запасных маршрутов). Наилучшим решением представляется построение

маршрутов на множестве виртуальных графов сети, создаваемом на основе прогнозируемого с помощью когнитивных нейросетевых алгоритмов качества связи в требуемом временном интервале. При этом само построение маршрута является классическим поиском кратчайшего пути (нескольких путей) на взвешенном графе.

Таким образом, наиболее актуальной задачей, требующей применения когнитивных алгоритмов, является прогнозирование качества связи между парами МКА на основе фактических (исторических) данных об их взаимном положении, состоянии их аппаратной платформы и соответствующем качестве связи.

Результаты и их обсуждение

Основным требованием, предъявляемым к когнитивным функциям сетевого ПО, является замкнутый контур обучения реализующих их интеллектуальных алгоритмов, что подразумевает обучение лишь на фактических данных о состоянии узлов сети (МКА), ее топологии (наличии прямой видимости) и качестве связи. Использование любых критериев экспертной оценки (например, семантических градаций качества связи или состояния МКА), равно как и введение искусственной разметки исходных данных, предполагает добавление в контур обучения (дообучения) эксперта или оператора, что, в свою очередь, делает неопределенной длительность каждой итерации обучения алгоритма и

точность получаемой нейросетевой модели, поскольку последняя начинает зависеть от точности разметки, а значит, от качества работы оператора.

Следовательно, разрабатываемые когнитивные модели должны быть сфокусированы на обучении с помощью апостериорной информации в следующем составе:

- орбитальные параметры и вектор состояния каждого МКА в составе сети;
- матрица прямой видимости – квадратная симметричная относительно главной диагонали матрица, каждый элемент которой сигнализирует о наличии прямой видимости между соответствующей парой МКА;
- матрица фактического качества связи, конфигурация которой аналогична матрице прямой видимости, а каждый элемент описывает частоту передачи проактивных сообщений.

Апостериорная информация постоянно изменяется и для корректного использования в процессе обучения должна быть снабжена временными метками. Поскольку информация собирается со всей сети, необходима временная синхронизация ее узлов. Результатом работы создаваемой когнитивной модели является прогнозируемая матрица качества связи (а точнее, их кортеж, покрывающий некоторый временной интервал, например ближайшие 3-6 часов).

Варианты реализации когнитивной модели и выбора конкретной архитектуры нейронной сети зависят от

используемых входных данных, среди которых следует выделить следующие:

- прогнозирование качества связи на основе прямой видимости;
- прогнозирование качества связи на основе трехмерных геодезических координат;
- прогнозирование качества связи на основе прямой видимости и векторов состояния МКА;
- прогнозирование качества связи на основе прямой видимости, трехмерных геодезических координат и векторов состояния МКА.

Рассмотрим подробнее названные варианты.

Первым вариантом решения задачи прогнозирования является порождение

матрицы качества связи на основе матрицы прямой видимости, которая рассчитывается исходя из орбитальных параметров МКА. Данная матрица, по сути, является бинарной маской для прогнозирования, которое должно быть выполнено только для ненулевых элементов. Представив матрицу прямой видимости в виде бинарного изображения, а матрицу качества – полутонового, задачу следует сформулировать как порождение изображения по бинарной маске. Данная задача решается с помощью генеративных состязательных сетей (Generative adversarial network, GAN) [19], которые используют обучающие данные для порождения правдоподобных изображений (рис. 1).

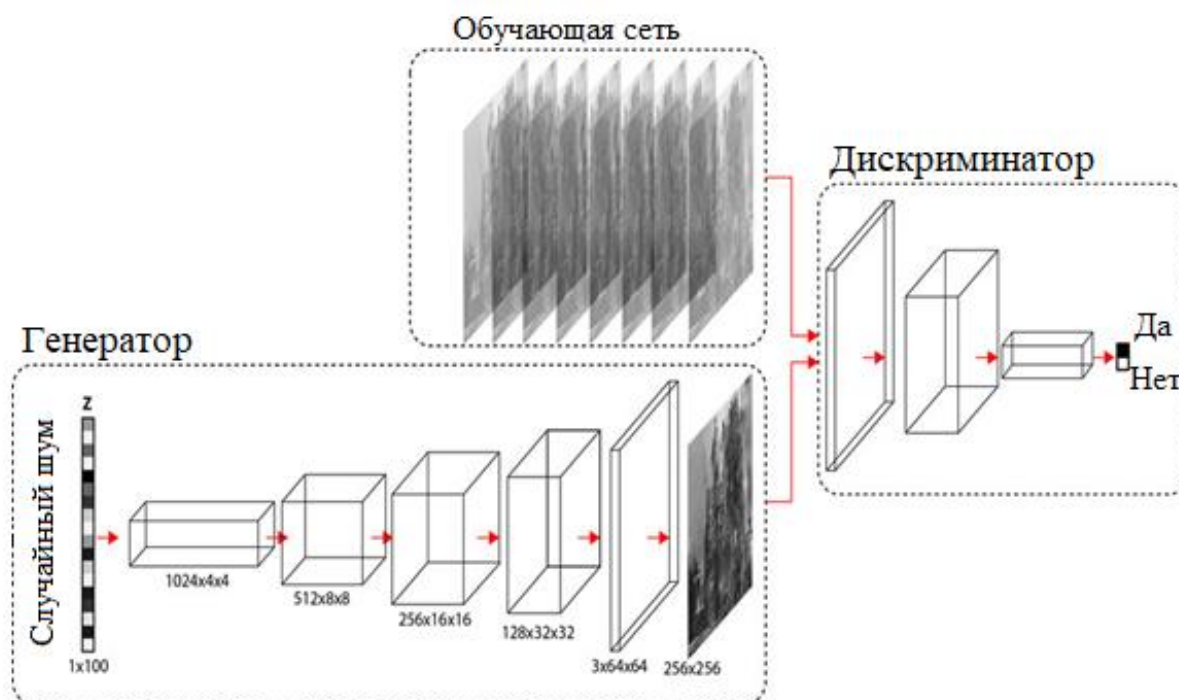


Рис. 1. Архитектура классической GAN-сети

Fig. 1. Architecture of a classical GAN-network

Архитектурно GAN включает в себя генерирующую сеть (генератор, generator), порождающую варианты результирующего изображения, и дискриминирующую сеть (дискриминатор, discriminator), которая проверяет их адекватность. Классические варианты генератора, создающие изображения из вектора значений гауссова шума [20], для задачи прогнозирования не подходят,

поскольку они, по сути, не имеют входных параметров.

Генератор для решения описанной выше задачи должен иметь структуру, подобную сегментирующим сетям SEGNET или U-Net [21; 22], что позволяет анализировать входную бинарную матрицу прямой видимости и порождать на ее основе матрицу прогнозируемого качества связи (рис. 2).

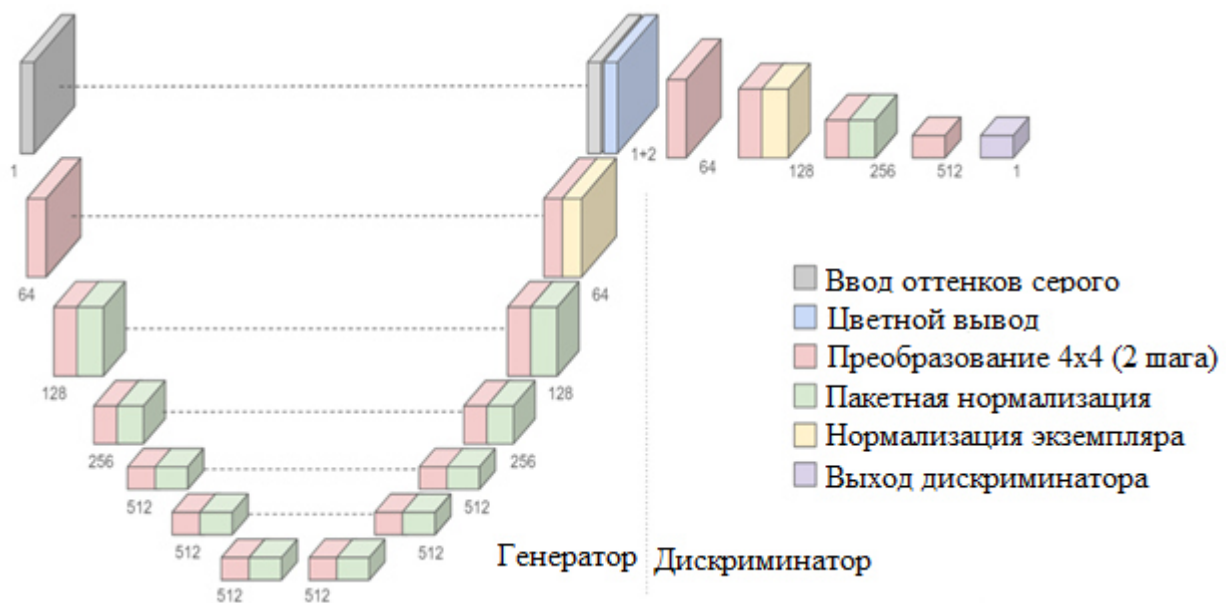


Рис. 2. Архитектура U-Net подобной GAN-сети

Fig. 2. U-Net architecture of a similar GAN-network

Дискриминатор выполняет сопоставление результатов генерации с особенностями обучающих данных и определяет итоговое соответствие.

Описанный подход чрезвычайно прост в реализации, т. к. практически не требует модификации готовых решений. Однако результат работы подобного GAN-алгоритма в задаче прогнозирования может варьироваться в широчайших пределах и с вероятностью, близкой к единице, не будет коррелировать с фактической информацией о качестве связи

в силу того, что входные данные не отражают ни состояния МКА, ни их положения и распределения в пространстве.

Вариант адаптации классического GAN-алгоритма позволяет использовать в качестве ключа для порождения матрицы прогнозируемого качества связи вектор трехмерных геодезических координат вместо случайных значений гауссова шума. Матрица прямой видимости при этом должна использоваться как вход дискриминатора для отсеивания некорректных прогнозов, а также

накладываться в качестве итоговой бинарной маски на лучший результат.

Описанное решение использует больше фактических данных, и, очевидно, его прогноз обладает меньшей априорной неопределенностью по сравнению с предыдущим вариантом. Вместе с этим сам принцип представления матриц прямой видимости и качества связи в виде изображений имеет общий критический недостаток – семантически элементы матриц не имеют пространственной корреляции. Если изменить индексацию МКА в рамках сети, то пространственная структура матриц изменится, однако фактически они останутся тождественными. Данный факт является большой проблемой для любых сверточных архитектур нейронных сетей (будь то генеративные или классические сегментационные), которые создавались для обработки изображений в первую очередь на основе локальных пространственных структур. Выходом из ситуации может служить особый вид аугментации обучающих данных с помощью синхронной случайной перестановки строк и столбцов вектора геодезических координат МКА, а также матриц прямой видимости и качества связи. Побочным эффектом является «раздувание» обучающей выборки и рост времени обучения. Плюс алгоритмы прогнозирования никак не учитывают состояние оборудования МКА.

Реализация варианта прогнозирования качества связи на основе прямой видимости и векторов состояния МКА

аналогична предыдущей за исключением того, что в качестве ключа для генерации будет использован не вектор трехмерных геодезических координат, а вектор состояний МКА. Проблема пространственной некоррелированности элементов матриц прямой видимости и качества связи, равно как высокой априорной неопределенности результатов прогнозирования, сохраняется.

Оптимальным вариантом с точки зрения полноты входных данных, для реализации которого с учетом описанных выше недостатков необходимо рассмотреть другие подходы к их группировке и соответственно выбрать более подходящую архитектуру, является прогнозирование качества связи на основе прямой видимости, трехмерных геодезических координат и векторов состояния МКА.

В первую очередь для избавления от локализации ложных пространственных структур в матрицах необходимо перейти к прогнозированию отдельных элементов матрицы качества, что сводит задачу к предсказанию скалярного значения на основе входного вектора (два вектора состояний МКА плюс координаты обоих МКА). Наиболее подходящей и современной архитектурой для данной постановки задачи является Transformer, основанная на механизме внутреннего внимания и имитирующая когнитивную способность человека фокусироваться на определенных особенностях входных данных для принятия решения (рис. 3).

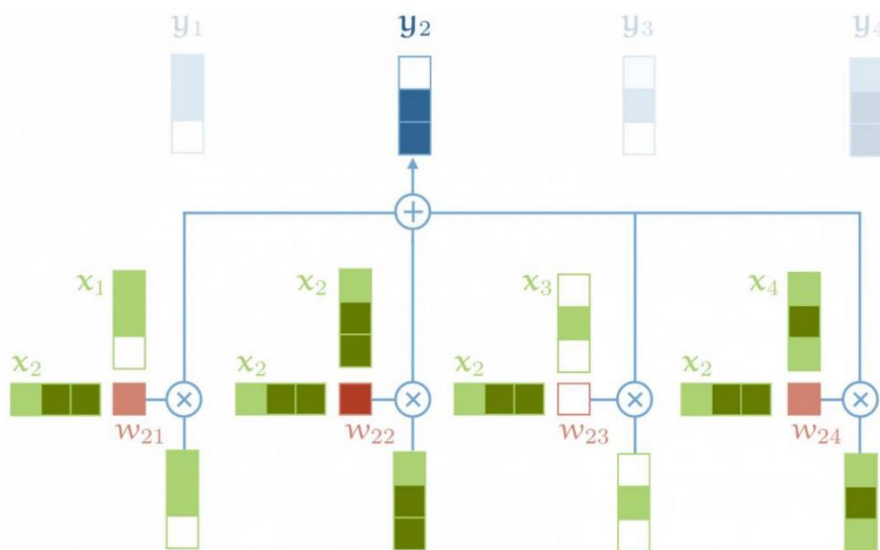


Рис. 3. Архитектура сети Transformer с визуализацией работы механизма внутреннего внимания [23]

Fig. 3. Architecture of the Transformer network with visualization of the internal attention mechanism [23]

Вектора состояний МКА и их координаты формируют входной вектор X , который с помощью «механизма внимания» на основе нормированного скалярного произведения (Scaled Dot-Product Attention) со множеством весовых коэффициентов, настраиваемых при обучении, трансформируется в прогнозируемое качество связи. Возможен также вариант использования векторов состояния в качестве входа сети, а координат – в качестве описания контекста (embedding), или наоборот.

Алгоритм прогнозирования на основе Transformer реализуется в каждом МКА, он будет постоянно обучаться на основе исторических данных о качестве связи с другими МКА группировки, квантованными с интервалом 10–30 с. Результатом предсказания будет выступать вектор аналогичным образом квантованных вещественных значений

качества в диапазоне $[0,1]$, где 0 – отсутствие связи. При вводе в группировку нового МКА возможен перенос весовых коэффициентов для использования в качестве стартовой предобученной модели, которая будет лишь донастраиваться на актуальных данных.

Принятие решения об удалении спутника из группировки производится на основе результатов решения задачи прогнозирования видимости спутника и отнесения МКА к классу отключенных от группировки спутников. Для решения задачи прогнозирования каналов связи МКА в системе применяется нейронная сеть архитектуры Transformer.

Единственной потенциальной проблемой данного решения видится отсутствие корреляции отдельных прогнозов качества связи во времени. Следовательно, как при обучении, так и при прогнозировании необходимо использовать

временные ряды параметров и координат конкретных пар МКА, обладающих ненулевой прямой видимостью. Специально для анализа временных рядов

применяются рекуррентные нейронные сети (Recurrent neural networks, RNN), наиболее распространенной из которых является LSTM (рис. 4).

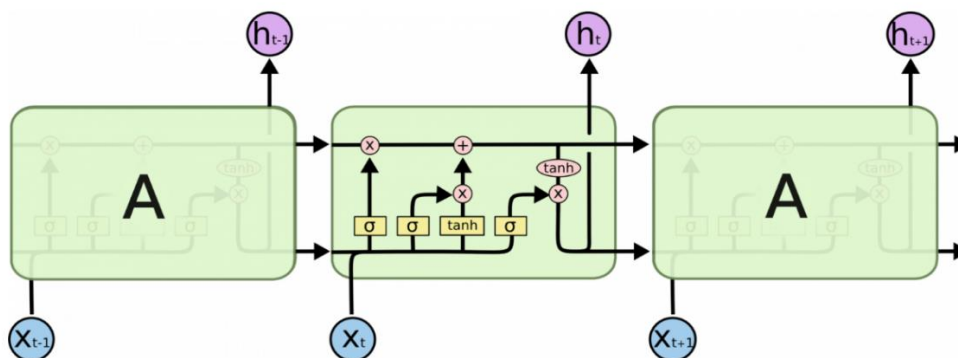


Рис. 4. Архитектура LSTM-сети [23]

Fig. 4. LSTM network architecture [23]

Идея работы RNN как раз состоит в использовании в качестве входных данных для текущего прогноза не только векторов состояния МКА и их координат, но и предыдущего значения качества связи, которое может быть как фактическим, так ранее спрогнозированным. Анализ публикаций показывает, что ИНС архитектуры Transformer позволяют решать задачу прогнозирования временных рядов с аналогичной LSTM-точностью, но быстрее обучаются и накладывают меньше ограничений на выходные данные [24; 25].

Очевидно, что бортовые вычислительные мощности как отдельного МКА, так и сети в целом не позволяют выполнять прогнозирование и тем более обучение на борту. Следовательно, требуется выделенный наземный сегмент прогнозирования и мониторинга, который будет собирать апостериорную информацию, периодически выполнять

обучение когнитивной модели, использовать ее для прогнозирования качества связи и передавать результаты узлам сети для построения маршрутов передачи данных.

По результатам проведенного анализа современных решений и архитектур нейронных сетей для реализации когнитивных функций сетевого ПО выбрана архитектура Transformer, которая позволяет использовать всю полноту априорных данных, обладает высокой скоростью обучения и прогнозирования.

Выводы

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Анализ методов управления группировкой МКА показал, что наиболее эффективным является метод управления на принципах искусственного интеллекта, поскольку моделирование

когнитивных возможностей человека по прогнозированию поведения сети и реализация немонотонных принципов принятия решений позволяют совместить расчётные и прогнозные шаги алгоритмов по управлению группировкой как единой системой.

2. Анализ современных программных средств для управления группировкой МКА показал, что существующие решения в составе программно-аппаратных средств управления аппаратом создаются на языке программирования низкого уровня, используют закрытые протоколы, не имеют встроенных функций оценки структуры сети, выделенных настроечных сервисов, что не позволяет в полной мере реализовать функциональность, необходимую для эффективного управления сетью МКА в составе mesh-сети.

Определение когнитивных функций сетевого программного обеспечения управления группировкой взаимодействующих МКА показало, что наиболее

актуальной задачей, требующей применения когнитивных алгоритмов, является прогнозирование качества связи между парами МКА на основе фактических (исторических) данных об их взаимном положении, состоянии их аппаратной платформы и соответствующем качестве связи, что позволит эффективно управлять сетью взаимодействующих МКА.

3. Анализ современных решений и выбор архитектуры нейронной сети для реализации когнитивных функций сетевого программного обеспечения управления группировкой взаимодействующих малых космических аппаратов показал, что наиболее полно требованиям проекта отвечают нейронные сети архитектуры Transformer, которые основаны на механизме внутреннего внимания. Архитектура Transformer позволяет использовать всю полноту априорных данных, обладает высокой скоростью обучения и прогнозирования.

Список литературы

1. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Балансировка информационной нагрузки между воздушным и космическим сегментами объединенной воздушно-космической сети связи, построенной на основе mesh-технологии // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2016. Т. 8, № 1. С. 17–25.
2. Аганесов А. В., Макаренко С. И. Модель воздушно-космической сети связи с иерархическим принципом ретрансляции информационных потоков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. Т. 4, № 20. С. 43–51.
3. Аганесов А. В. Модель сети спутниковой связи на основе протокола случайного множественного доступа S-ALOHA // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 2. С. 99–134.

4. Аганесов А. В. Анализ качества обслуживания в воздушно-космической сети связи на основе иерархического и децентрализованного принципов ретрансляции информационных потоков // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 3. С. 92–121.
5. Оценка своевременности связи при передаче мультисервисного трафика в сети спутниковой связи специального назначения / Е. А. Новиков, Д. Р. Уткин, А. Г. Шадрин, М. Н. Квасов // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 1. С. 136–155.
6. Митряев Г. А., Новиков Е. А., Уткин Д. Р. Модель прогнозирования пользовательской нагрузки в обратном канале сети спутниковой связи на основе вейвлет-преобразования // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: труды II Межвузовской научно-практической конференции. СПб.: Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного, 2017. Т. 2. С. 140–143.
7. Новиков Е. А., Зиннуров С. Х. Модель гибкого обслуживания трафика сложной структуры и алгоритм оперативного резервирования дополнительных каналов в земных станциях спутниковой связи // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 1. С. 98–115.
8. Модель гибкого обслуживания мультисервисного трафика в земных станциях спутниковой связи / Е. А. Новиков, С. Х. Зиннуров, В. В. Гапонов, Е. Н. Астахов // Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники: сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции. СПб.: Арт-Экспресс, 2016. Т. 2. С. 344–348.
9. Новиков Е. А., Уткин Д. Р. Прогнозирование пользовательской нагрузки, поступающей на коммутационное оборудование земной станции военной сети спутниковой связи // Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники: сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции. СПб.: Арт-Экспресс, 2016. Т. 2. С. 378–382.
10. Huang C., Liu F. A distributed class-based alternative routing under a congestion control architecture for LEO satellite networks // 2010 IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Information Security (WCNIS). Beijing, China: IEEE, 2010. P. 431–435.
11. Agent-Based Distributed Routing Algorithm with Traffic Prediction for LEO Satellite Network / Z. Na, Z. Gao, Y. Cui, L. Chen, Q. Guo // International Journal of Future Generation Communication & Networks. 2013. Vol. 6, N 3. P. 67.
12. An Optimal Rate Control and Routing Scheme for Multipath Networks / W. Sun, Y. Zhang, H. Zhang, S. Li // Int. J. of Computers, Communications & Control. 2011. Vol. 6, N 4. P. 657–668.

13. Load Balancing Routing Based on Agent for Polar-orbit LEO Satellite Networks / J. Zhu, Y. Rao, L. Fu, W. Chen, X. Shao // *Journal of Information & Computational Science*. 2012. Vol. 9, N 5. P. 1373–1384.
14. Explicit Load Balancing Technique for NGE0 Satellite IP Networks with On-Board Processing Capabilities / T. Taleb, D. Mashimo, A. Jamalipour, N. Kato // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2009. Vol. 17, N 1. P. 281–293.
15. Zihe G., Qing G., Zhenyu N. A. Distributed Multipath Routing Strategy for LEO Satellite Networks // *Tamkang Journal of Science and Engineering*. 2011. Vol. 14, N 2. P. 161–169.
16. Туманов А. В., Зеленцов В. В., Щеглов Г. А. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов. М.: Издательство Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, 2018. 572 с.
17. Перспективы научных исследований в области сетей связи на 2017–2020 годы / А. Е. Кучерявый, А. Г. Владыко, Р. В. Киричек, М. А. Маколкина, А. И. Парамонов, А. И. Выборнова, Р. Я. Пирмагомедов // *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2016. Т. 4, № 3. С. 1–14.
18. Емельянов С. Г., Бобырь М. В., Бондаренко Б. А. Нечетко-логическая система распознавания цвета с помощью быстродействующего дефаззификатора // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2022. Т. 26, № 4. С. 103–116.
19. Koucheryavy A., Vladyko A., Kirichek R. State of the Art and Research Challenges for Public Flying Ubiquitous Sensor Networks // *Lecture Notes in Computer Science*. 2015. Vol. 9247. P. 299–308.
20. Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks. URL: <https://arxiv.org/abs/1611.07004> (дата обращения: 25.09.2023).
21. Generative Adversarial Nets. URL: <https://arxiv.org/pdf/1406.2661.pdf> (дата обращения: 18.09.2023).
22. Building Footprint Extraction from High Resolution Aerial Images Using Generative Adversarial Network Architecture. URL: <https://www.researchgate.net/publication/346027874> (дата обращения: 18.09.2023).
23. End-to-End Conditional GAN-based Architectures for Image Colourisation. URL: <https://arxiv.org/pdf/1908.09873.pdf> (дата обращения: 18.09.2023).
24. Attention Is All You Need. URL: <https://arxiv.org/pdf/1706.03762.pdf> (дата обращения: 18.09.2023).
25. Depth-Gated Recurrent Neural Networks. URL: <https://arxiv.org/pdf/1508.03790v2.pdf> (дата обращения: 18.09.2023).

References

1. Aganesov A. V., Makarenko S. I. Balansirovka informacionnoï nagruzki mezhdu vozdushnym i kosmicheskim segmentami ob"edinennoï vozdušno kosmicheskoï seti svyazi, postroennoï na osnove mesh-tekhnologii [Balancing the information load between the air and space segments of the integrated aerospace communication network built on the basis of mesh technology]. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyah Zemli = Scienceintensive Technologies in Space Research of the Earth*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 17–25.

2. Aganesov A. V., Makarenko S. I. Model' vozdušno-kosmicheskoï seti svyazi s ierarhicheskim principom retranslyacii informacionnyh potokov [Model of an aerospace communication network with a hierarchical principle of relaying information flows]. *Radio-tekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy = Radio Engineering and Telecommunication Systems*, 2015, vol. 4, no. 20, pp. 43–51.

3. Aganesov A. Model' seti sputnikovoï svyazi na osnove protokola sluchainogo mnozhestvennogo dostupa S-ALOHAV [Model of a satellite communication network based on the protocol of random multiple access S-ALOHA]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Control Systems, Communications and Security*, 2015, no. 2, pp. 99–134.

4. Aganesov A. V. Analiz kachestva obsluzhivaniya v vozdušno-kosmicheskoï seti svyazi na osnove ierarhicheskogo i decentralizovannogo principov retranslyacii informacionnyh potokov [Analysis of the quality of service in the aerospace communication network based on the hierarchical and decentralized principles of information flow retransmission]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Management, Communication and Security systems*, 2015, no. 3, pp. 92–121.

5. Novikov E. A., Utkin D. R., Shadrin A. G., Kvasov M. N. Ocenka svoevremennosti svyazi pri peredache mul'tiservisnogo trafika v seti sputnikovoï svyazi special'nogo naznacheniya [Evaluation of the timeliness of communication during the transmission of multiservice traffic in a satellite communication network for special purposes]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Management, Communication and Security Systems*, 2018, no. 1, pp. 136–155.

6. Mitryaev G. A., Novikov E. A., Utkin D. R. [A model for predicting user load in the reverse channel of a satellite communication network based on wavelet transform]. *Problemy tekhnicheskogo obespecheniya voïsk v sovremennykh usloviyah. Trudy II Mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferencii* [Problems of technical support for troops in modern conditions. Proceedings of the II interuniversity scientific-practical conference]. St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny Publ., 2017, pp. 140–143. (In Russ.)

7. Novikov E. A., Zinnurov S. Kh. Model' gibkogo obsluzhivaniya trafika slozhnoi struktury i algoritm operativnogo rezervirovaniya dopolnitel'nyh kanalov v zemnykh stantsiyah sputnikovoï svyazi [A model of flexible service for traffic of a complex structure and an

algorithm for the operational reservation of additional channels in earth stations of satellite communications]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Control Systems, Communications and Security*, 2017, no. 1, pp. 98–115.

8. Novikov E. A., Zinnurov S. Kh., Gaponov V. V., Astakhov E. N. [Model of flexible servicing of multiservice traffic in satellite earth stations]. *Sovremennye problemy sozdaniya i ekspluatacii vooruzheniya, voennoĭ i special'noĭ tekhniki. Sbornik statej III Vserossiĭskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Modern problems of creation and operation of weapons, military and special equipment. Collection of articles of the III All-Russian Scientific and Practical Conference]. St. Petersburg, Art-Express Publ., 2016, vol. 2, pp. 344–348. (In Russ.)

9. Novikov E. A., Utkin D. R. [Forecasting the user load arriving at the switching equipment of the earth station of the military satellite communications network]. *Sovremennye problemy sozdaniya i ekspluatacii vooruzheniya, voennoĭ i special'noĭ tekhniki. Sbornik statej III Vserossiĭskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Modern problems of the creation and operation of weapons, military and special equipment. Collection of articles of the III All-Russian Scientific and Practical Conference]. St. Petersburg, Art-Express Publ., 2016, pp. 378–382. (In Russ.)

10. Huang C., Liu F. A distributed class-based alternative routing under a congestion control architecture for LEO satellite networks. 2010 IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Information Security (WCNIS). Beijing, China, 2010, pp. 431–435.

11. Na Z., Gao Z., Cui Y., Chen L., Guo Q. Agent-Based Distributed Routing Algorithm with Traffic Prediction for LEO Satellite Network. *International Journal of Future Generation Communication & Networks*, 2013, vol. 6, no. 3, p. 67.

12. Sun W., Zhang Y., Zhang H., Li S. An Optimal Rate Control and Routing Scheme for Multipath Networks. *Int. J. of Computers, Communications & Control*, 2011, vol. 6, no. 4, pp. 657–668.

13. Zhu J., Rao Y., Fu L., Chen W., Shao X. Load Balancing Routing Based on Agent for Polar-orbit LEO Satellite Networks. *Journal of Information & Computational Science*, 2012, vol. 9, no. 5, pp. 1373–1384.

14. Taleb T., Mashimo D., Jamalipour A., Kato N. Explicit Load Balancing Technique for NGEOSatellite IP Networks with On-Board Processing Capabilities. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, vol. 17, no. 1, pp. 281–293.

15. Zihe G., Qing G., Zhenyu N. A. Distributed Multipath Routing Strategy for LEO Satellite Networks. *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 2011, vol. 14, no. 2, pp. 161–169.

16. Tumanov A. V., Zelentsov V. V., Shcheglov G. A. Osnovy komponovki bortovogo oborudovaniya kosmicheskikh apparatov [Fundamentals of the layout of the onboard equipment of spacecraft]. Moscow, House of the Bauman Moscow State Technical University Publ., 2018. 572 p.

17. Kucheryavyi A. E., Vladyko A. G., Kirichek R. V., Makolkina M. A., Paramonov A. I., Vybornova A. I., Pirmagomedov R. Ya. Perspektivy nauchnyh issledovaniy v oblasti setei svyazi na 2017–2020 gody [Prospects for scientific research in the field of communication networks for 2017–2020]. *Informacionnye tekhnologii i telekommunikacii = Information Technologies and Telecommunications*, 2016, vol. 4. no. 3, pp. 1–14.
18. Emelyanov S. G., Bobyr M. V., Bondarenko B. A. Nechetko-logicheskaya sistema raspoznavaniya cveta s pomoshch'yu bystrodejstvuyushchego defazzifikatora [Fuzzy-logical color recognition system using a fast defuzzifier]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2022, vol. 26, no. 4, pp. 103–116.
19. Koucheryavy A., Vladyko A., Kirichek R. State of the Art and Research Challenges for Public Flying Ubiquitous Sensor Networks. *Lecture Notes in Computer Science*, 2015, vol. 9247, pp. 299–308.
20. Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks. Available at: <https://arxiv.org/abs/1611.07004>. (accessed 25.09.2023)
21. Generative Adversarial Nets. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1406.2661.pdf>. (accessed 18.09.2023)
22. Building Footprint Extraction from High Resolution Aerial Images Using Generative Adversarial Network Architecture. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/346027874>. (accessed 18.09.2023)
23. End-to-End Conditional GAN-based Architectures for Image Colourisation. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1908.09873.pdf>. (accessed 18.09.2023)
24. Attention Is All You Need. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1706.03762.pdf>. (accessed 18.09.2023)
25. Depth-Gated Recurrent Neural Networks. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1508.03790v2.pdf>. (accessed 18.09.2023)

Информация об авторах / Information about the Authors

Шиленков Егор Андреевич, кандидат технических наук, директор научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем имени Константина Эдуардовича Циолковского, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ub3wcl@yandex.ru

Egor A. Shilenkov, Cand. of Sci. (Engineering), Director of the Research Institute of Space Instrumentation and Radioelectronic Systems named after Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ub3wcl@yandex.ru

Фролов Сергей Николаевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем имени Константина Эдуардовича Циолковского, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: snfrolov@bk.ru

Титенко Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем имени Константина Эдуардовича Циолковского, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: johntit@mail.ru

Мирошниченко Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института космического приборостроения и радиоэлектронных систем имени Константина Эдуардовича Циолковского, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: oldguy7@rambler.ru

Sergey N. Frolov, Cand. of Sci. (Engineering), Leading Researcher, Research Institute of Space Instrumentation and Radioelectronic Systems named after Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: snfrolov@bk.ru

Evgeniy A. Titenko, Cand. of Sci. (Engineering), Leading Researcher, Research Institute of Space Instrumentation and Radioelectronic Systems named after Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: johntit@mail.ru

Sergey Y. Miroshnichenko, Cand. of Sci. (Engineering), Leading Researcher, Research Institute of Space Instrumentation and Radioelectronic Systems named after Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: oldguy7@rambler.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-27-53>

УДК 004.8.032.26

Гибридный нейронечеткий классификатор для мониторинга эффективности лечения заболеваний системы дыхания с учетом коморбидности

Е. В. Петрунина¹, С. А. Филист² ✉, Л. В. Шульга²,
В. Песок², Хайдер А. Х. Алавси², А. В. Бутусов²

¹ Московский политехнический университет
ул. Б. Семёновская, д. 38, г. Москва 107023, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: SFilist@gmail.com

Резюме

Цель исследования – разработка гибридного нейронечеткого классификатора для дистанционного контроля степени тяжести внебольничной пневмонии с учетом риска сопутствующих заболеваний.

Методы. Для оценки степени тяжести внебольничной пневмонии и определения эффективности ее плана лечения в гибридный нейронечеткий классификатор включена гибридная нейронная сеть, которая содержит три макрослоя: PNN-FNN-FNN*. Число решающих блоков макрослоя PNN равно числу сегментов, выделенных в пространстве информативных признаков, а на выходе каждого блока PNN выдаются оценки риска и отсутствия риска внебольничной пневмонии по кластерам степени тяжести. Агрегация принимаемых решений по N сегментам пространства информативных признаков осуществляется в слое FNN, который имеет структуру нечеткого модуля принятия решений. Агрегация 2L выходов PNN-FNN происходит в макрослое FNN*. В этом же макрослое учитывается влияние коморбидности на степень тяжести внебольничной пневмонии.

Результаты. Апробация гибридного нейронечеткого классификатора степени тяжести внебольничной пневмонии проведена на экспериментальной группе больных внебольничной пневмонией с коморбидностью в виде ишемической болезни сердца. Показатели качества классификации степени тяжести пневмонии с учетом риска коморбидного заболевания на примере ишемической болезни сердца показали, что агрегация классификатора степени тяжести внебольничной пневмонии и классификатора риска коморбидного заболевания в виде гибридного нейронечеткого классификатора позволяет повысить качество оценки степени тяжести внебольничной пневмонии более чем на 10% по всем показателям качества.

Заключение. Гибридный нейронечеткий классификатор, построенный на разных парадигмах распознавания образов, позволяет выделять кластеры тяжести заболевания и повысить показатели качества классификации степени тяжести внебольничной пневмонии при наличии коморбидности в среднем на 12%.

Ключевые слова: внебольничная пневмония; мониторинг и прогнозирование степени тяжести заболевания; коморбидность; нейронечеткий классификатор; нечеткий логический вывод; поддержка принятия врачебных решений.

Финансирование: Исследования выполнены в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» программы стратегического академического лидерства «Приоритет – 2030».

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

Для цитирования: Формализованное информационное описание для медицинской экспертной системы / Е. В. Петрунина, С. А. Филист, Л. В. Шульга, В. Песок, Хайдер А. Х. Алави, А. В. Бутусов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 27–53. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-27-53>.

Поступила в редакцию 04.10.2023

Подписана в печать 03.11.2023

Опубликована 22.12.2023

Hybrid Neuro-Fuzzy Classifier for Monitoring the Effectiveness of Treatment of Diseases of the Respiratory System, Taking into Account Comorbidity

Elena V. Petrunina¹, Sergey A. Filist² ✉, Leonid V. Shulga², Valeriya Pesok², Hayder A. H. Alawsi², Andrey V. Butusov²

¹ Moscow Polytechnic University
38 B. Semenovskaya Str., Moscow 107023, Russian Federation

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

✉ e-mail: SFilist@gmail.com

Abstract

The purpose of research is to develop a hybrid neuro-fuzzy classifier for remote monitoring of the severity of community-acquired pneumonia, taking into account the risk of concomitant diseases.

Methods. To assess the severity of community-acquired pneumonia and determine the effectiveness of its treatment plan, a hybrid neural network is included in the hybrid neuro-fuzzy classifier, which contains three macrolayers: PNN-FNN-FNN*. The number of decisive blocks of the PNN macrolayer is equal to the number of segments allocated in the space of informative features, and the output of each PNN block produces risk and non-risk assessments of community-acquired pneumonia by severity clusters. Aggregation of decisions made over N segments of the space of informative features is carried out in the FNN layer, which has the structure of a fuzzy decision-making module. The aggregation of 2L PNN-FNN outputs occurs in the FNN* macrolayer. The same macrolayer takes into account the influence of comorbidity on the severity of community-acquired pneumonia.

Results. The testing of a hybrid neuro-fuzzy classifier of the severity of community-acquired pneumonia was carried out on an experimental group of patients with community-acquired pneumonia with comorbidity in the form of coronary heart disease. Indicators of the quality of classification of the severity of pneumonia taking into account the risk of comorbid disease using the example of coronary heart disease showed that the aggregation of the classifier of the severity of community-acquired pneumonia and the classifier of the risk of comorbid disease in the form of a hybrid neuro-fuzzy classifier makes it possible to improve the quality of assessing the severity of community-acquired pneumonia by more than 10% for all quality indicators.

Conclusion. A hybrid neuro-fuzzy classifier, built on different pattern recognition paradigms, makes it possible to identify clusters of disease severity and improve the quality indicators for classifying the severity of community-acquired pneumonia in the presence of comorbidity by an average of 12%.

Keywords: community-acquired pneumonia; monitoring and forecasting the severity of the disease; comorbidity; neuro-fuzzy classifier; fuzzy logical inference; medical decision support.

Funding: The research was carried out within the framework of the development program of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Southwest State University" of the strategic academic leadership program "Priority-2030".

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

For citation: Petrunina E. V., Filist S. A., Shulga L. V., Pesok V., Hayder A. H. Alawsi, Butusov A. V. Formalized Information Description for a Medical Expert 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*. 2023; 13(4): 27–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-27-53>.

Received 04.10.2023

Accepted 03.11.2023

Published 22.12.2023

Введение

Патология системы дыхания в форме внебольничной пневмонии (ВБП) занимает лидирующее положение среди болезней органов дыхания [1; 2]. При амбулаторном лечении ВБП врачу необходимо принимать важные решения, связанные с госпитализацией больного, а также с оценкой эффективности плана лечения. Для формализации решения о госпитализации в медицинской практике используют ряд шкал оценки степени тяжести ВБП. Однако они включают множество факторов риска, которые трудно контролировать в процессе ведения больного в амбулаторных условиях. Второй проблемой классификации степени тяжести пневмонии являются коморбидные заболевания и схожесть их факторов риска с риском ВБП.

В настоящее время предпринимается множество попыток построить математические модели степени тяжести ВБП. Наиболее известные многомерные линейные модели и модели логистической регрессии [3; 4]. Для определения значимости каждого информативного признака в модель используются

различные критерии. Однако такие модели не удовлетворяют специалистов, так как врачи, как правило, работают с нечеткими данными, что вызывает проблемы при их дефазификации, и модели многомерной регрессии требуют знания четких значений входных переменных. Поэтому пристальное внимание исследователей привлекают нейронечеткие сети [5; 6; 7; 8; 9]. Они основываются на нечетких правилах и алгоритмах в отличие от традиционных классификаторов, которые используют бинарные или действительные значения входных переменных. Однако проблема обучения таких сетей пока не решена, поэтому в представленном исследовании принято решение комбинировать в одной структуре как нечеткие сети, так и обучаемые полносвязные нейронные сети (НС).

Материалы и методы

Модели классификаторов медицинского риска

Для реализации моделей мониторинга тяжести заболевания и эффективности лечения на основе гибридного нейронечеткого классификатора (ГНК)

используются многоагентные структуры. При этом каждый автономный интеллектуальный агент (АИА) работает со своим пространством информативных признаков (ПИП). Для построения АИА используем вероятностные нейронные сети (PNN) [10; 11]. Агрегацию решений PNN по M группам ПИП осуществляет нечеткая нейронная сеть (FNN) [5; 12; 13; 14; 15].

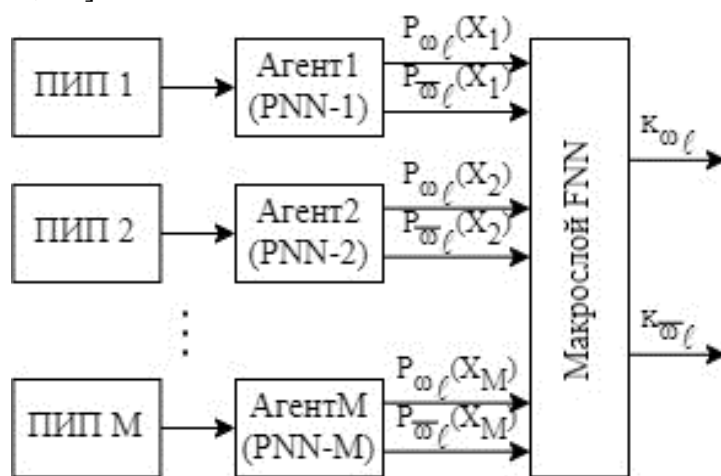


Рис. 1. Структура многоагентной системы классификации

Fig. 1. Structure of a multi-agent classification system

Макрослой PNN построен по блочному принципу, в соответствии с которым каждый блок PNN является дихотомическим классификатором и относит неизвестный образец либо к «своему» кластеру ω_ℓ , либо к кластеру «все остальное» $\bar{\omega}_\ell$. Число решающих блоков PNN в макрослое PNN определяется количеством M используемых ПИП, и каждый блок PNN выделяет L кластеров степени тяжести ВБП. Поэтому на выходе каждого блока PNN_i имеем L двухкомпонентных векторов, первые компоненты которых показывают вероятности P_{ω_ℓ} для кластера ω_ℓ , а вторые –

В задачу ГНК входит интеграция накопленного практического опыта диагностики ВБП по сегментам ПИП. Использование одной многослойной НС для классификации таких данных сложно [5; 16]. На рисунке 1 представлена упрощенная структура классификатора PNN-FNN с разделением пространства предикторов на M сегментов.

вероятности $P_{\bar{\omega}_\ell}$ для альтернативного кластера $\bar{\omega}_\ell$ (в общем случае $P_{\omega_\ell} + P_{\bar{\omega}_\ell} \neq 1$).

Вероятности $P_{\omega_\ell}(X_i)$ и $P_{\bar{\omega}_\ell}(X_i)$ определены, согласно [5; 10], по следующим формулам:

$$P_{\omega_\ell}(X_i) = \sum_{j=1}^{\lambda_{\omega_\ell}} \exp \left(\frac{-\|X_i - X_{i\omega_\ell}^j\|^2}{\sigma^2} \right), \quad (1)$$

$$P_{\bar{\omega}_\ell}(X_i) = \sum_{j=1}^{\lambda_{\bar{\omega}_\ell}} \exp \left(\frac{-\|X_i - X_{i\bar{\omega}_\ell}^j\|^2}{\sigma^2} \right), \quad (2)$$

где X_i – вектор дескрипторов неизвестного образца по i -му ПИП; λ_{ω_ℓ} – число

образцов-примеров в датасет i -го ПИП, отнесенных экспертами к кластеру ω_ℓ ; $\lambda_{\omega_\ell}^-$ – число образцов-примеров в датасет i -го ПИП, отнесенных экспертами к кластерам $\bar{\omega}_\ell$; $X_{i\omega_\ell}^j$ – j -й пример из кластера ω_ℓ из i -го ПИП; $X_{i\bar{\omega}_\ell}^j$ – j -й пример из кластера $\bar{\omega}_\ell$ из i -го ПИП; σ – настраиваемый параметр, который в общем случае будет различен для различных кластеров.

Представленная на рисунке 1 структура выделяет только один кластер степени тяжести ВБП. Если необходимо определить вероятности нахождения

пациента в L кластерах ВБП, то, соответственно, необходимо использовать L раз формулы (1) и (2).

Двухканальная агрегация L пар выходов PNN-FNN происходит с помощью еще одного макрослоя – FNN_ℓ^* (рис. 2). Макрослой FNN^* состоит из L модулей FNN с одинаковой структурой. Каждый блок этого макрослоя состоит из двух нейронных слоев. В этом же макрослое учитывается влияние коморбидности на степень тяжести ВБП. Этот слой является моделью экспертной оценки результатов, получаемых в макрослоях PNN-FNN.

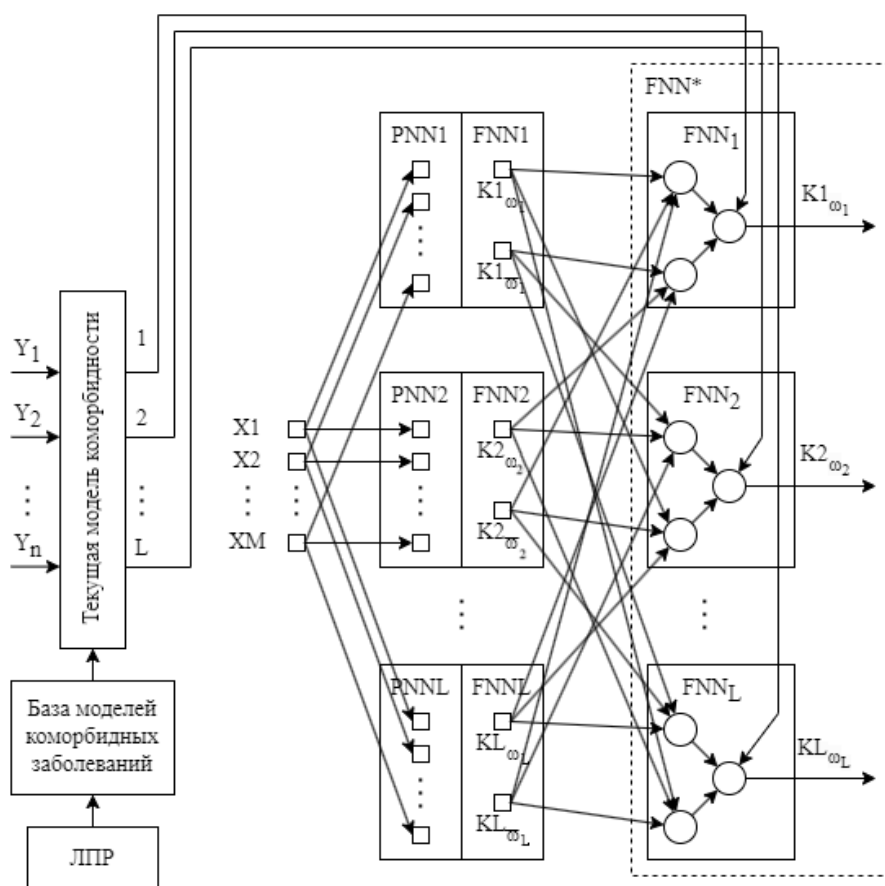


Рис. 2. Структура гибридной нейронной сети PNN-FNN-FNN*

Fig. 2. Structure of the hybrid neural network PNN-FNN-FNN*

Первый слой содержит два нейрона. В первом осуществляется вычисление уверенности нахождения патологии в кластере степени тяжести ВБП ω_ℓ , а во втором – уверенность ее нахождения в других кластерах $\bar{\omega}_\ell$. Схема соединения выходов структуры PNN-FNN и входов макрослоя FNN* построена таким образом, чтобы нечеткая операция, которая осуществляется в нейронах первого слоя, была аналогична операции алгебраического сложения вероятностей, поэтому на нейроны первого слоя модулей макрослоя FNN* поступают свидетельства, подтверждающие одно и то же событие: на первый нейрон поступает информация, подтверждающая нахождение пациента в кластере ω_ℓ , а на второй – информация, подтверждающая его нахождение вне этого кластера $\bar{\omega}_\ell$.

Второй слой модуля макрослоя FNN* агрегирует нечеткую информацию предшествующего слоя и содержит один нейрон. Алгоритм операции, которая в нем реализуется, представлен на рисунке 3. Входными параметрами алгоритма являются операнды a , b , c и d . Операнды a и b – это выходы соответствующих нейронов первого слоя соответствующего модуля макрослоя FNN*. Эти операнды агрегируются в блоке 2 в соответствии с формулой [17]

$$Cmb(a,b) = \frac{a-b}{1-\min(a,b)}, \quad (3)$$

где a – уверенность нахождения патологии в кластере ω_ℓ ; b – уверенность нахождения патологии в кластерах $\bar{\omega}_\ell$.

В блоке 3 выполняется сравнение величины Cmb с пороговым значением c :

ЕСЛИ $Cmb \leq c$ ТО $K_{\omega_\ell} = 0$ (блок 5),

ИНАЧЕ «выполняем блок 4», (4)

где K_{ω_ℓ} – уверенность нахождения патологии в кластере степени тяжести ω_ℓ .

Если результат вычисления Cmb превысил порог c , то в блоке 4 вычисляется коэффициент уверенности нахождения пациента в кластере ω_ℓ . В этом же блоке учитывается влияние коморбидности на степень тяжести ВБП посредством операции tms :

$$tms = Cmb \cdot d. \quad (5)$$

С этой целью для каждого коморбидного заболевания строится логистическая модель:

$$R_{\omega_\ell}(k) = \frac{\exp(t)}{1 + \exp(t)}, \quad (6)$$

где $t = \beta_0 + \beta_1 y_1 + \beta_2 y_2 + \dots + \beta_n y_n$; $y_1, \dots, y_i, \dots, y_n$ – факторы риска коморбидной патологии ω_ℓ ; $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_i, \dots, \beta_n$ – параметры модели, определяемые при обучении; k – номер контрольной точки, в которой определен медицинский риск (МР) ИБС по факторам риска (ФР), представленным диаграммой (рис. 4).

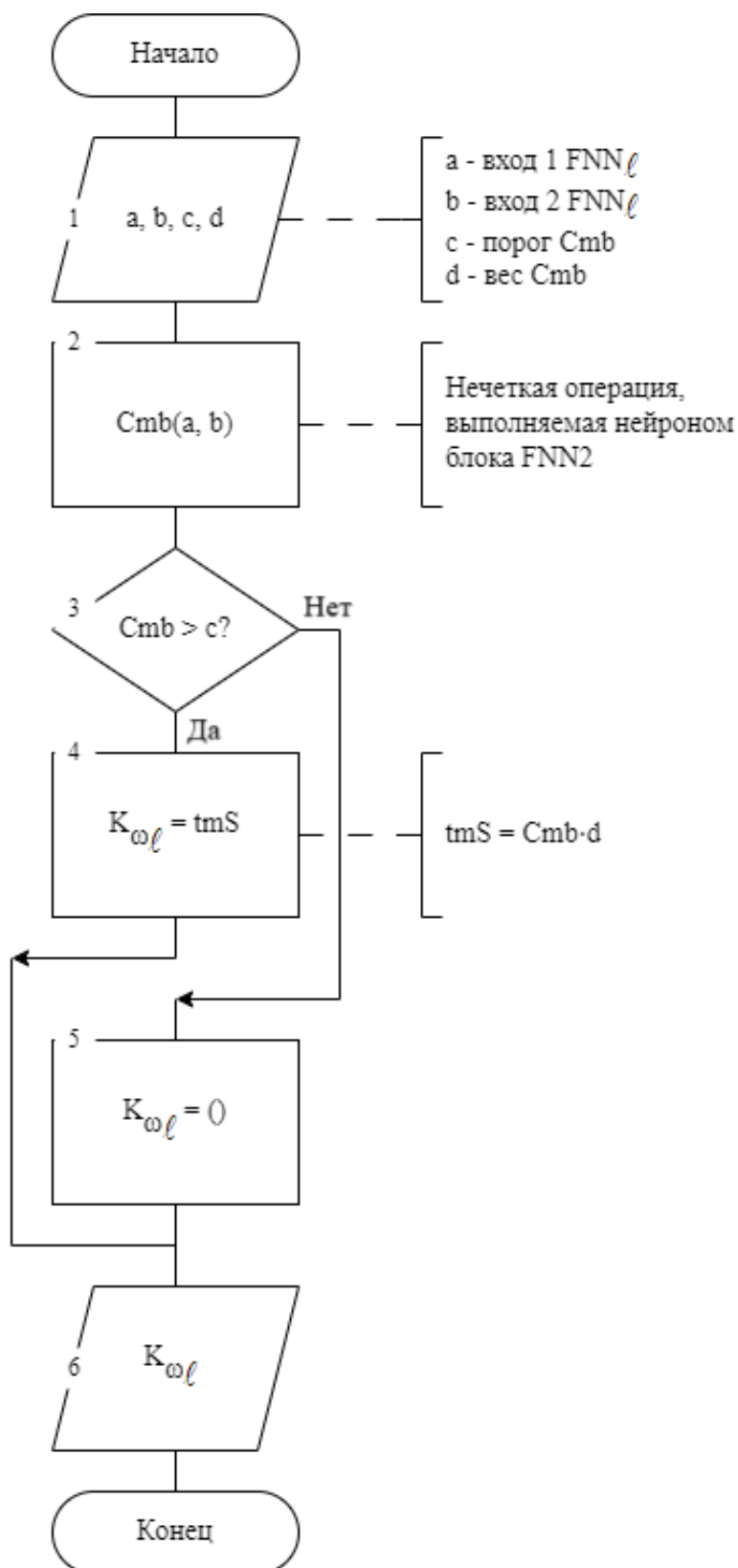


Рис. 3. Схема алгоритма нечеткой операции во втором слое блоков макрослоя FNN*

Fig. 3. Scheme of the fuzzy operation algorithm in the second layer of blocks of the FNN* macrolayer

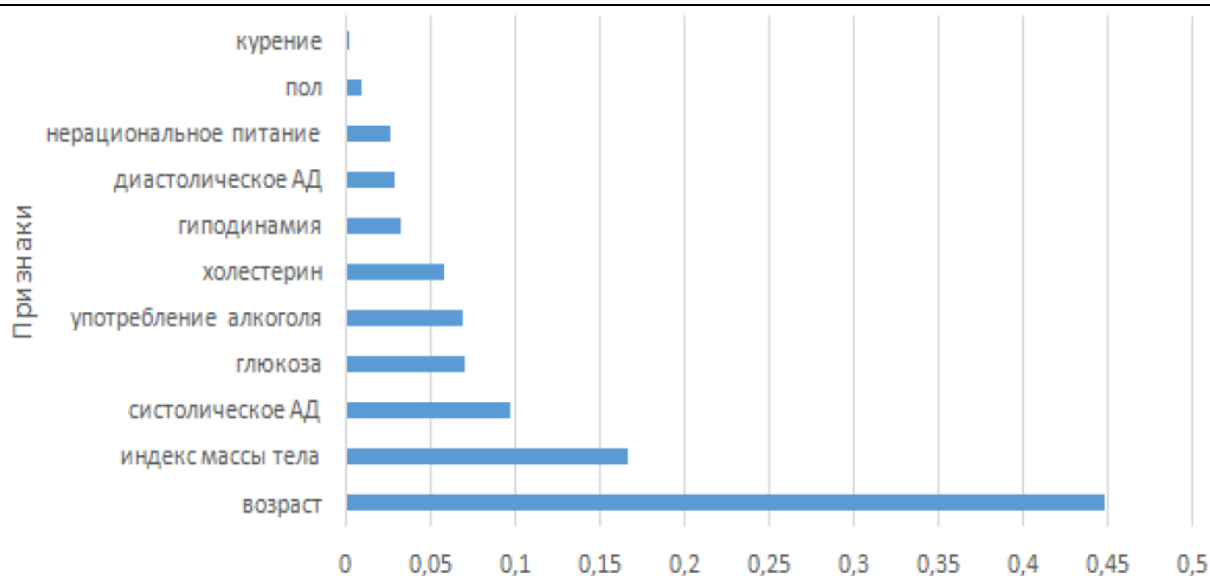


Рис. 4. Диаграмма значимости факторов риска ишемической болезни сердца

Fig. 4. Diagram of the significance of risk factors for coronary heart disease

В общем случае операнд d является вектором, число компонент которого определяется числом кластеров степени тяжести ВБП. В принципе этих компонент может быть меньше. В частном случае d вырождается в скаляр, и на все модули макрослоя FNN* подается одинаковое число, учитывающее влияние коморбидности на кластер степени тяжести ВБП.

Таким образом, в слой FNN* интегрируется база моделей коморбидных заболеваний. Учитывая, что коморбидное заболевание известно априори, ЛПР имеет возможность подключить к слою FNN* соответствующую модель коморбидного заболевания, которая формирует МР по данному заболеванию. На выходе модели только один выход, а не L , как показано на рисунке 2. Однако здесь необходимо учесть следующие обстоятельства. Выход текущей модели коморбидности может только увеличить

риск ВБП, поэтому его значение подается на выходной нейрон модуля макрослоя слоя FNN*. Это значение необходимо «взвесить» по степени МР основного заболевания, т. е. ВБП. Весовые коэффициенты $w_1, w_2, \dots, w_L$ при этом определяются либо при обучении гибридной НС, либо задаются экспертами. Таким образом, выходной слой модулей макрослоя FNN* может быть реализован как посредством обучаемой НС, так и используя нечеткую НС, согласно алгоритму рисунка 3 и формулы (2).

Система поддержки принятия врачебных решений при мониторинге пациентов, больных внебольничной пневмонией

Для формализации решения по госпитализации больного ВБП используют ряд шкал оценки степени тяжести ВБП [18; 19]. Эти шкалы имеют ряд недостатков, обусловленных специфической особенностью больной оценки, а также

неоднозначностью в релевантности некоторых ФР (например, «возраст»).

В связи с вышеизложенным выдвигается ряд требований, которым должна удовлетворять система поддержки принятия врачебных решений (СППВР) мониторинга степени тяжести ВБП:

- ФР ВБП должны быть сгруппированы по блокам таким образом, чтобы отсутствие некоторых ФР в том или ином блоке или полное отключение блока ФР не приводило к некорректной работе СППВР;

- в СППВР должна быть предусмотрена возможность как получения «сырых» данных из базы пациентов поликлиники, так и путем оперативной передачи данных о состоянии здоровья пациента самим пациентом или автоматически без его участия;

- в СППВР должен быть включен модуль контроля степени тяжести ВБП, основанный на одной из рабочих шкал риска ВБП или на нескольких шкалах, с комбинацией ФР или возможности выбора одной из рабочих шкал степени тяжести ВБП;

- в СППВР необходимо включить базу классификаторов степени тяжести коморбидных заболеваний с возможностью выбора ЛПР конкретного классификатора риска коморбидного заболевания;

- в СППВР необходимо включить модуль контроля эффективности лечения ВБП;

- учитывая, что для врача важен дифференциальный диагноз между вирусной инфекцией ВБП и бактериальной ВБП, так как ошибка приводит к необоснованному назначению антимикробных препаратов, в СППВР должен присутствовать модуль дифференциальной диагностики вирусной ВБП и бактериальной ВБП.

Структурная схема СППВР, предназначенной для оценки степени тяжести ВБП мониторинга эффективности лекарственных назначений и удовлетворяющая этим требованиям, представлена ниже (рис. 5).

В ее состав входят три решающих модуля. В первом модуле определяется степень тяжести ВБП, показатель которой учитывается врачом при принятии решения о госпитализации пациента. Во втором модуле оценивается изменение степени тяжести ВБП в процессе лечения и при необходимости вносятся коррективы в план лечения ВБП, эффективность плана лечения ВБП. Третий модуль предназначен для поддержки принятия решений при дифференциальной диагностики ВБП.

Модуль контроля степени тяжести ВБП работает совместно с модулем оценки риска коморбидного заболевания. ЛПР при необходимости может подключить этот модуль к модулю оценки степени тяжести ВБП, предварительно выбрав из базы классификаторов МР коморбидных заболеваний соответствующий классификатор МР.

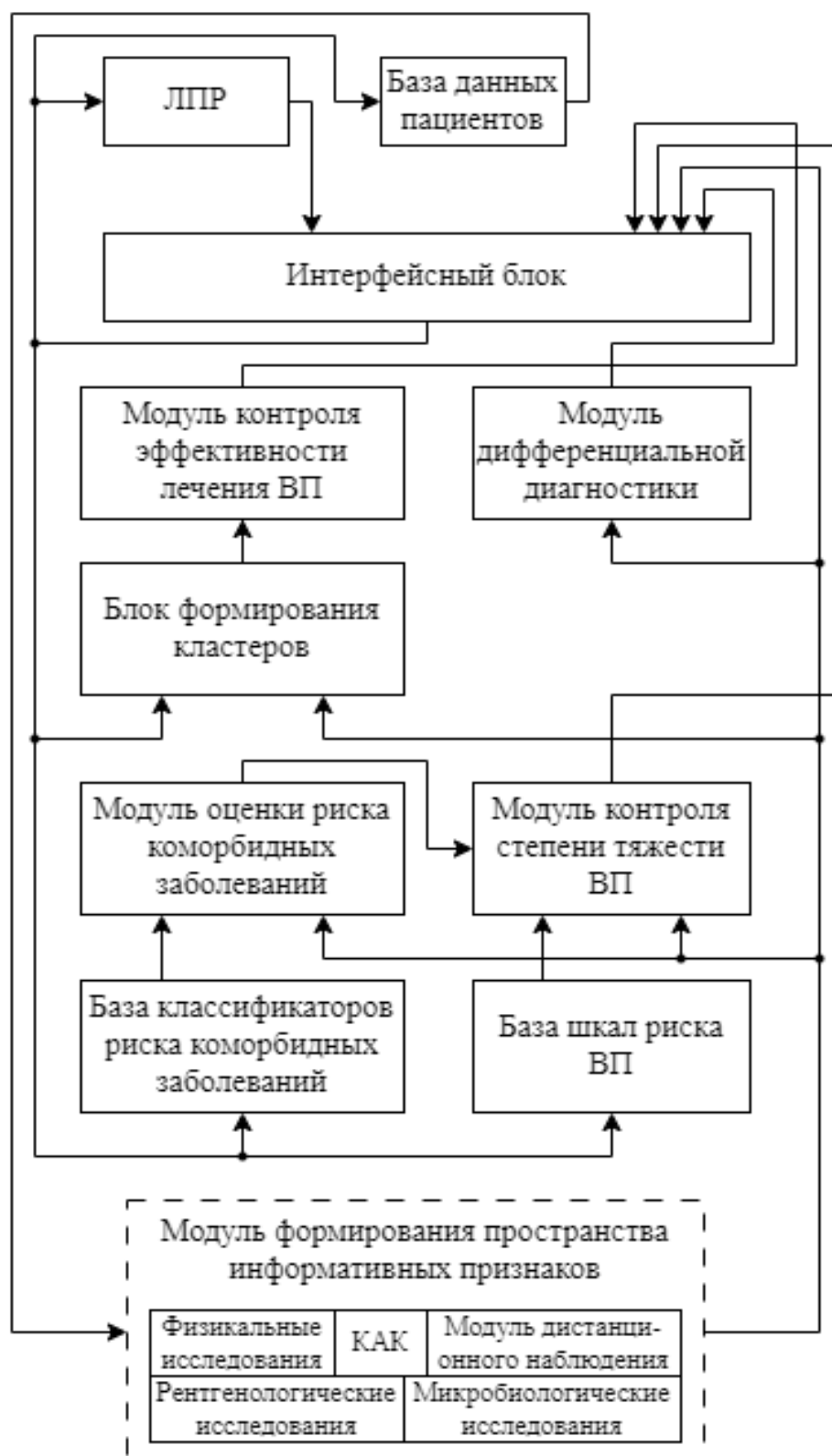


Рис. 5. Структурная схема СППВР для мониторинга состояния здоровья пациентов, больных внебольничной пневмонией

Fig. 5. Structural diagram of the MDSS for monitoring the health status of patients with community-acquired pneumonia

Результаты и их обсуждение

Синтез классификатора для оценки риска коморбидного заболевания

Правильный кластер степени тяжести ВБП оперативно установить весьма сложно, что связано с наличием коморбидных заболеваний, которые имеют общие ФР с ВБП, а также оказывают значительное влияние на ее степень тяжести. Поэтому важно оценить влияние коморбидного заболевания на решение вопроса по госпитализации больного, а также контролировать в процессе лечения ВТБ развитие не только основного

заболевания – ВБП, но и коморбидного заболевания – ИБС.

В частности, это относится к ишемической болезни сердца (ИБС). Поэтому в ГНК был включен решающий модуль, позволяющий оценить влияние риска ИБС на риск ВБП. Классификатор риска ИБС – гибридный классификатор (ГК) был построен по методике, предложенной в [4; 20]. В таблице 1 представлен вариант такого набора ФР, а также их градации, которые использовались при построении ГК ишемического риска.

Таблица 1. Информативные признаки риска ишемической болезни сердца

Table 1. Informative signs of risk of coronary heart disease

ФР	Наименование ФР	Подкатегория ФР	Наименование подкатегории ФР
x_1	Возраст	–	–
x_2	Половая принадлежность	0	Ж
		1	М
x_3	Семейное положение	1	Состоит в браке, психологический климат в семье благоприятный
		2	Холост
		3	Состоит в браке, психологический климат в семье неблагоприятный
x_4	Наследственные факторы риска развития ИБС	0	В анамнезе ИБС присутствует
		1	В анамнезе ИБС отсутствует
x_5	Сахарный диабет	0	Нет
		1	Да
x_6	Ожирение	0	Нет
		1	Да
x_7	Гиподинамия	0	Нет
		1	Да
x_8	Курение	0	Нет
		1	Да

Окончание табл. 1 / Table 1 (ending)

ФР	Наименование ФР	Подкатегория ФР	Наименование подкатегории ФР
x_9	Приём алкоголя	0	Нет
		1	Да
x_{10}	Стрессовые ситуации	0	Нет
		1	Да
x_{11}	Уровень содержания холестерина в крови	1	4,5–5ммоль/л
		2	>5ммоль/л
x_{12}	Уровень артериального давления	1	Соответствует возрастной норме
		2	Выше нормы
		3	Ниже нормы
x_{13}	Сократительная функция миокарда	0	Не нарушена
		1	Нарушена
x_{14}	Общая продолжительность ишемических изменений по ЭКГ	0	Менее года
		1	Больше года
x_{15}	Смещение сегмента ST	0	Ниже оси
		1	Норма
		2	Выше оси
x_{16}	Частота сердечных сокращений	0	Брадикардия
		1	Норма
		2	Тахикардия
x_{17}	Количество аритмических эпизодов за сутки	–	–
x_{18}	Перекисное окисление липидов (ПОЛ)	–	–
x_{19}	Антиокислительная активность (АОА)	–	–

Наибольшую прогностическую ценность при прогнозировании ишемического риска (по Кульбаку) имеют ФР x_{12} , x_{14} , ..., x_{20} . Данные ФР обеспечивают достаточный для формирования практических заключений прогноз. Для повышения точности прогнозирования развития риска ИБС на основе полученных

экспертных заключений в пул ФР введен дополнительный ФР – уровень психоэмоционального напряжения (ПЭН, x_{21}). Уровень ПЭН определяется согласно методике, предложенной в [21].

Для получения шкалы ишемического риска использовалась кривая кумулятивной выживаемости, полученная

по результатам наблюдения экспериментальной группы больных ИБС в течение 24 месяцев. Кумулятивная выживаемость в экспериментальной группе представлена на графике (рис. 6). В качестве контрольной точки сердечно-сосудистого события выбрано событие

«инфаркт миокарда» или «летальный исход». Для выделения кластеров ишемического риска график кумулятивной выживаемости разбит на три диапазона: [0...8 месяцев], [8 месяцев... 24 месяца] и [>24 месяцев].

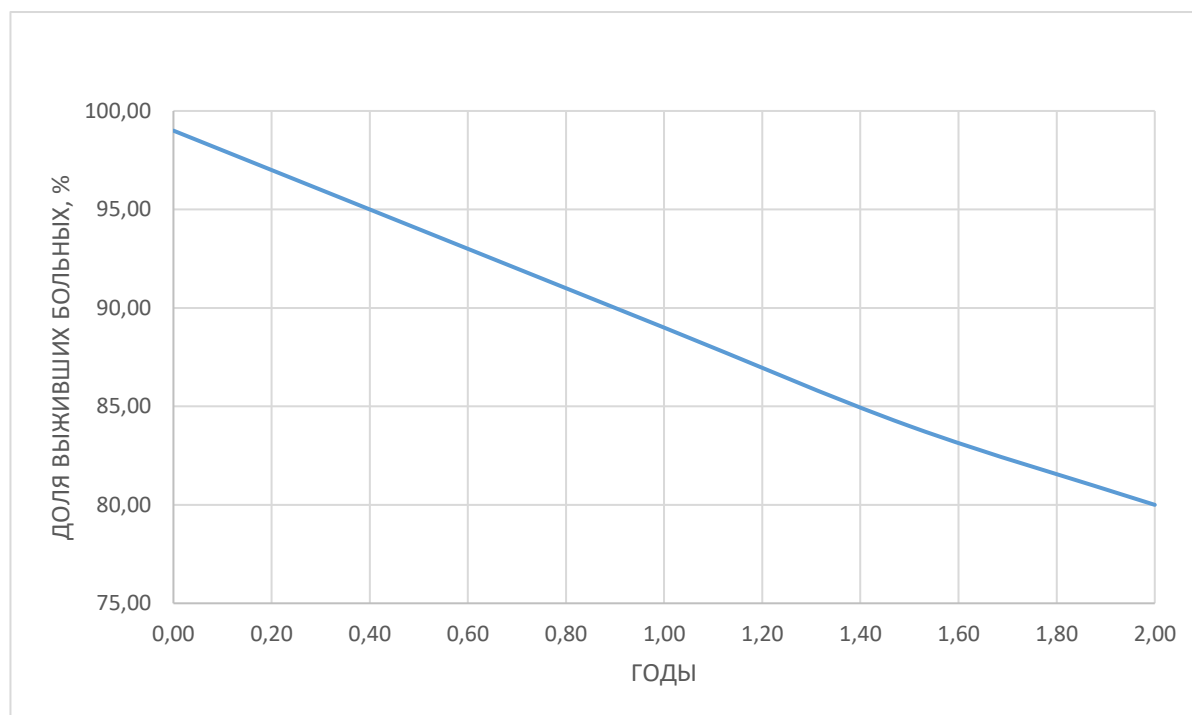


Рис. 6. Кумулятивная выживаемость в экспериментальной группе постинфарктных больных

Fig. 6. Cumulative survival in the experimental group of post-infarction patients

На рисунке 7 представлено распределение этих кластеров в двумерном пространстве информативных признаков в программном пакете *GuiGraf* [9; 22]. В качестве информативных признаков использовался индекс Gensini и баллы, полученные на шкале GRACE [1; 2] (С1 – высокий риск, С2 – низкий риск, С3 – средний риск). ГК риска ИБС синтезируется лицом, принимающим решения (ЛПР), с помощью специализированных программных средств. На

рисунке 8 представлена структурная схема ГК риска ИБС, построенного в соответствии набором ФР ИБС (табл. 1) и ПЭН. Пространство ФР $x_1 \dots x_{11}$ и $x_{12} \dots x_{18}$ было разделено на сегменты, в каждом из которых определялся коэффициент уверенности риска ИБС по данному сегменту ФР – КУ. В классификаторах, определяющих КУ1 и КУ2, были использованы виртуальные потоки (ВП) [23; 24; 25; 26].

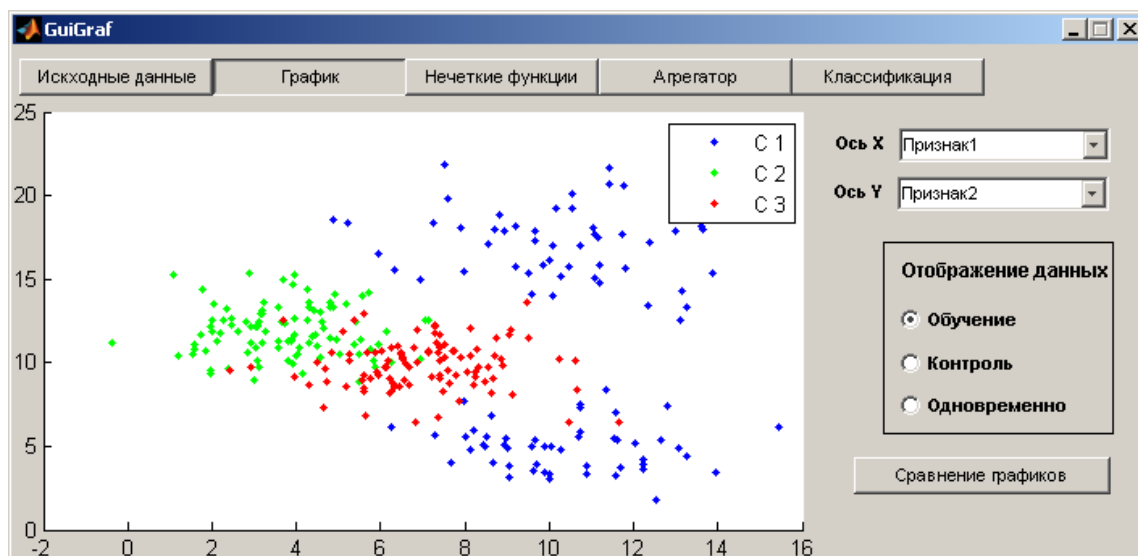


Рис. 7. Графический интерфейс модуля GuiGraf для отображения кластеров адаптационного потенциала, полученных по графику кумулятивной выживаемости в пространстве двух маркеров кардиологического риска

Fig. 7. Graphical interface of the GuiGraf module for displaying clusters of adaptive potential obtained from the cumulative survival graph in the space of two cardiac risk markers

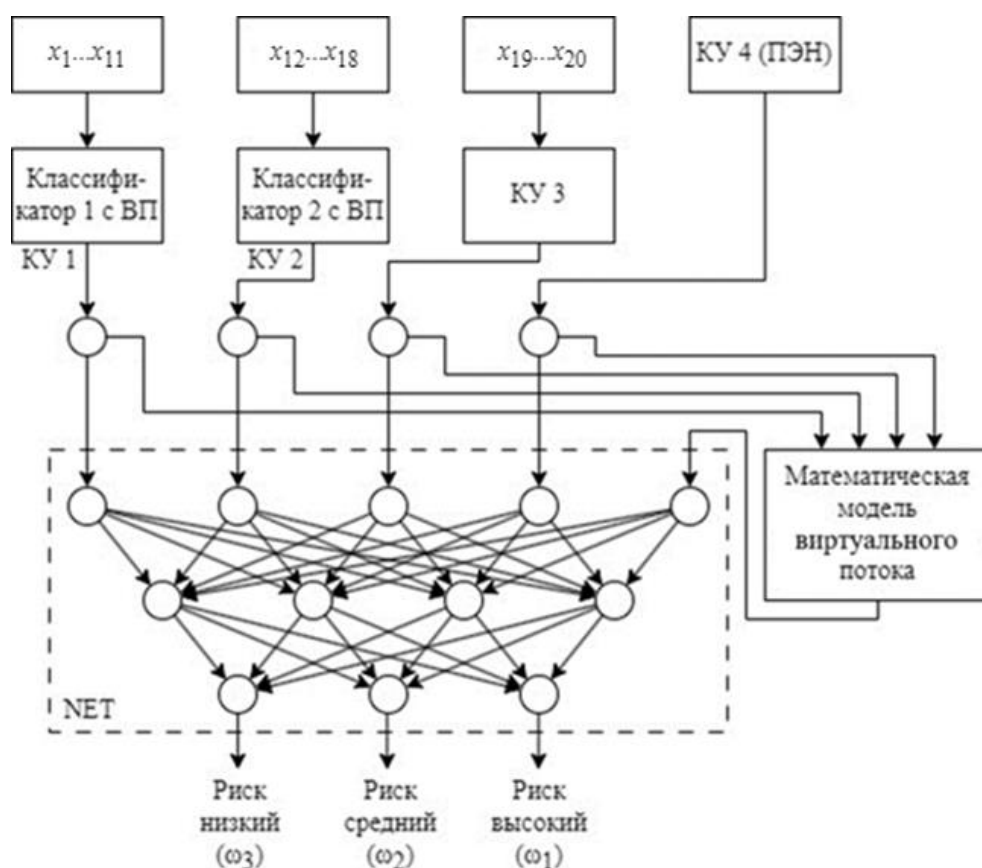


Рис. 8. Модель гибридного классификатора риска ишемической болезни сердца с виртуальными потоками

Fig. 8. Model of a hybrid risk classifier for coronary heart disease with virtual flows

Особенность ГК с ВП (рис. 9) заключается в том, что на входы НС поступают две группы ФР: ФР, подтверждающие текущую гипотезу (X_i), и ФР, которые опровергают текущую гипотезу ($\overline{X}_i$) [26]. Все эти ФР анализируются в классификаторе NET, на выходе которого имеем уверенность в текущей гипотезе (медицинский риск R_m). Коэффициент уверенности в медицинском риске

KU_m определяется на основе нечеткого логического вывода или построения математической модели и используется в качестве ВП на одном из входов классификатора NET. Его вес определяется в результате настройки нейронной сети NET (рис. 10). Отсутствие некоторых ФР не повлечет за собой нарушение работы НС, так как при возникновении такой ситуации, полагаем, $X_i = \overline{X}_i = 0$.

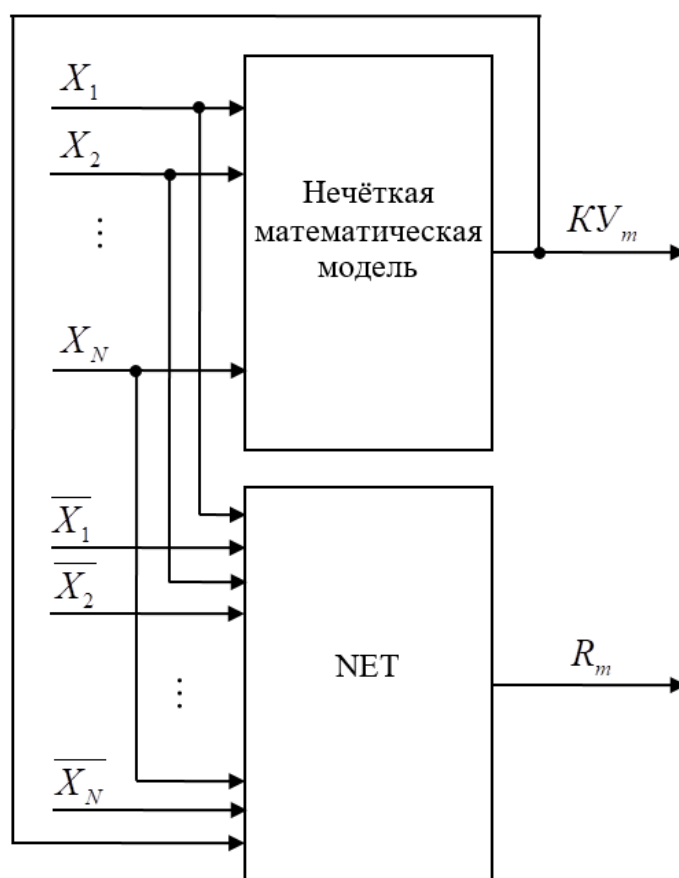


Рис. 9. Гибридный классификатор с виртуальным потоком

Fig. 9. Hybrid classifier with virtual stream

Коэффициент КУЗ (рис. 9) определяется с помощью «слабого» классификатора, полученного из ФР x_{18} и x_{19} (табл. 1). Дескрипторы по этим ФР определялись по следующим формулам:

$$\delta x_{\Pi} = \frac{x_{\Pi}^H - x_{\Pi}^T}{x_{\Pi}^H} 100\%, \quad (7)$$

$$\delta x_A = \frac{x_A^H - x_A^T}{x_A^H} 100\%, \quad (8)$$

где x_{Π}^H и x_A^H – ПОЛ и АОА в норме; $x_{\Pi}^T = x_{19}$ и $x_A^T = x_{20}$ – ПОЛ и АОА, соответственно, у обследуемого пациента.

На четвертый вход NET (рис. 9) поступает КУ4, отражающий риск ИБС по ПЭН пациента. Этот предиктор формируется из трех блоков признаков, описанных в [21]. Из четырех частных коэффициентов уверенности в риске ИБС формировался вектор {КУ1 ... КУ4}, по которому получали математическую модель ВП и который поступал на пятый вход нейронной сети NET [23; 24; 25]. В результате был сформирован пятикомпонентный вектор дескрипторов для нейронной сети NET, которая имеет три выхода, соответствующие классам «Низкий риск», «Средний риск» и «Высокий риск».

Оценка показателей качества классификации риска ИБС осуществлялась посредством ROC-анализа. Предвари-

тельно устанавливалось пороговое КУ_{Пор} значение решающего правила, и путем варьирования этого параметра изменялись соотношения между диагностической чувствительностью (ДЧ) и диагностической специфичностью (ДС) классификаторов ишемического риска. ROC-анализ осуществлялся при разделении двух классов – класс ω_1 и класс ω_0 ($\{\omega_2 \cup \omega_3\}$). В этом случае на выходе ГК имеем КУ _{ω_1} , и решение о принадлежности объекта к классу ω_1 принимается посредством решающего правила продукционного типа:

ЕСЛИ КУ _{ω_1} > КУ_{Пор} ТО ω_1 ИНАЧЕ ω_0 . (9)

Для получения ROC-кривой задавался шаг изменения КУ_{Пор}, а его динамический диапазон выбирался с учетом особенностей аппроксимации гистограмм H_{ω_0} и H_{ω_1} (рис. 10).

В таблице 2 приведены результаты ROC-анализа для построенного ГК.

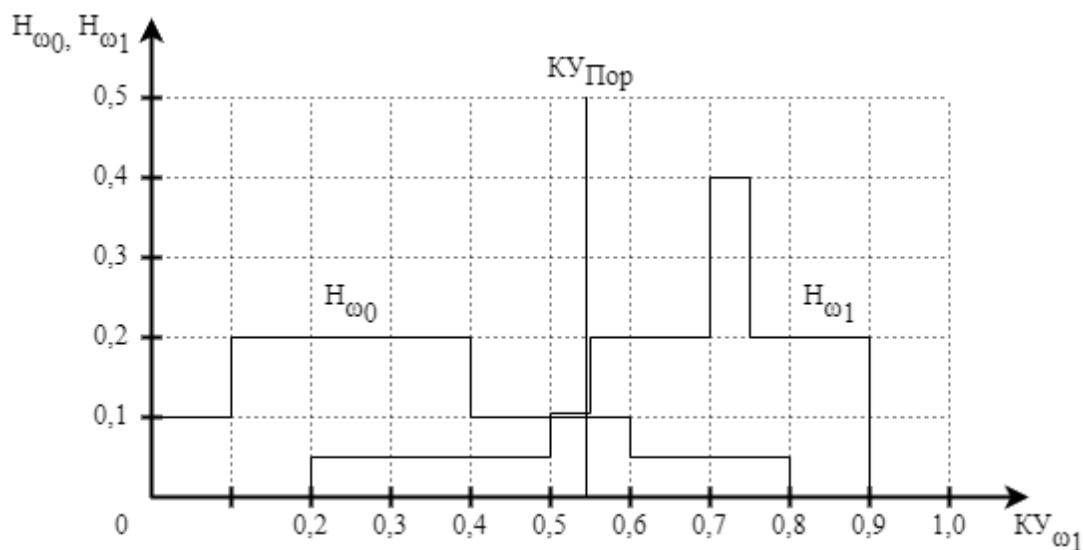


Рис. 10. Гистограммы распределения классов ω_0 и ω_1 по величине КУ _{ω_1}

Fig. 10. Histograms of the distribution of classes ω_0 and ω_1 by the value of CF _{ω_1}

Таблица 2. Результаты ROC-анализа для гибридного классификатора ишемического риска первого и нулевого классов**Table 2.** Results of ROC analysis for a hybrid classifier of ischemic risk of the first and zero classes

КУ _{Пор}	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
ДЧ	0,85	0,80	0,70	0,60	0,50	0,45	0,2
ДС	0,80	0,85	0,90	0,92	0,95	0,97	1

Показатели качества для предложенной модели ГК, полученные на контрольной выборке, и логистической

модели, которая была выбрана в качестве прототипа, полученные на той же самой выборке, приведены ниже (табл. 3).

Таблица 3. Экспериментальные данные по прогнозированию риска ИБС на контрольной выборке гибридным классификатором и классификатором-прототипом**Table 3.** Experimental data on predicting the risk of coronary artery disease on a control sample using a hybrid classifier and a prototype classifier

Обследуемые	Модель гибридного классификатора, %			Логистическая модель (10), %		
$n_{\omega_1} = 100$	90	94	88	75	79	77
$n_{\omega_2} = 60$	85	86		74	75	
$n_{\omega_3} = 30$	87	96		75	78	

В качестве прототипа для ГК ишемического риска была выбрана логистическая регрессионная модель [20]:

$$P = \frac{1}{1 + \exp(-z)}, \quad (10)$$

где параметр z определялся посредством уравнения регрессии

$$z = -4,29 + 1,37 \cdot Y_1 + 1,66 \cdot Y_2 + 3,36 \cdot Y_3, \quad (11)$$

где $Y_1 = 1$, если фракции выброса левого желудочка (ФВ ЛЖ) < 50 ; $Y_1 = 0$, если ФВ ЛЖ ≥ 50 ; $Y_2 = 1$, если анемия присутствует; $Y_2 = 0$, если анемия отсутствует; $Y_3 = 1$, если индекс Gensini ≥ 48 баллов; $Y_3 = 0$, если индекс Gensini < 48 баллов [20].

В ходе сравнительного анализа полученных данных было установлено, что

оценки, полученные в ходе работы предложенного ГК, в удовлетворительной степени соответствуют экспертным оценкам.

Экспериментальные исследования гибридного нейронечеткого классификатора степени тяжести внебольничной пневмонии при наличии коморбидности

В исследование было включено 80 пациентов, больных ВБП, с коморбидностью в виде ИБС. В таблице 4 представлены гендерные, возрастные и медицинские характеристики этих пациентов. Из этих пациентов были сформированы две экспериментальные группы: $n_{\omega_0} = 46$ без риска ИБС и $n_{\omega_1} = 34$

пациентов с коморбидным заболеванием ВБП + ИБС. Использовалась двухальтернативная классификация посредством

объединения пациентов со средней и тяжелой формами ВБТ в один класс (ω_0).

Таблица 4. Характеристики пациентов в экспериментальной группе

Table 4. Characteristics of patients in the experimental group

Показатели	Нетяжелая	Средняя	Тяжелая
1. Количество больных ВБП, абс., %	128 (64)	100 (33)	72 (36)
2. Количество больных с коморбидным (ИБС), заболеванием абс., %	34 (26,5)	28 (38)	18 (25)
3. Возраст, лет. Ме [Q25–Q75]	52 [36–68]	58 [38–72]	55 [41–76]
4. Доля мужчин, %	55	60	62
5. Доля женщин, %	45	40	38

В таблице 5 представлены экспериментальные данные по оценке степени тяжести ВБП в экспериментальной группе ВБП + ИБС на обучающей выборке классификатором, учитывающим риск коморбидного заболевания, и

классификатором без учета коморбидности NFN.

В таблице 6 приведены показатели качества разработанных классификаторов на обучающей выборке (ВБП + ИБС), вычисленные по данным таблицы 5.

Таблица 5. Экспериментальные данные по оценке степени тяжести ВБП в экспериментальной группе ВБП + ИБС на обучающей выборке

Table 5. Experimental data on assessing the severity of CAP in the experimental group CAP + CHD on the training set

Обследуемые	Гибридный нейронечеткий классификатор		Классификатор NFN	
	ω_0 (тяжелая)	ω_1 (легкая)	ω_0 (тяжелая)	ω_1 (легкая)
$n_{\omega_0} = 46$	38	8	30	16
$n_{\omega_1} = 34$	4	30	6	28

Таблица 6. Показатели качества классификаторов степени тяжести пневмонии на обучающей выборке

Table 6. Quality indicators of pneumonia severity classifiers on the training set

Обследуемые	Гибридный нейронечеткий классификатор, %			Классификатор NFN, %		
	ДЧ	ДС	ДЭ	ДЧ	ДС	ДЭ
$n_{\omega_0} = 46$	82	88	85	65	82	73
$n_{\omega_1} = 34$	88	82		82	65	

Контрольная группа формировалась путем случайного выбора по 25 пациентов из каждой из вышесформированных экспериментальных групп. В таблице 7 представлены результаты диагностики контрольной выборки коморбидных

пациентов (ВБП + ИБС) двумя разработанными классификаторами.

В таблице 8 приведены показатели качества гибридных классификаторов в контрольной группе (ВБП + ИБС), вычисленные по данным таблицы 7.

Таблица 7. Экспериментальные данные по оценке степени тяжести ВБП в экспериментальной группе ВБП + ИБС на контрольной выборке

Table 7. Experimental data on assessing the severity of CAP in the experimental group CAP + CHD in the control sample

Обследуемые	Гибридный нейросетевой классификатор		Классификатор NFN	
	ω_0 (тяжелая)	ω_1 (легкая)	ω_0 (тяжелая)	ω_1 (легкая)
$n_{\omega_0} = 25$	21	4	18	7
$n_{\omega_1} = 25$	3	22	6	19

Таблица 8. Экспериментальные данные по классификации степени тяжести пневмонии на контрольной выборке различными моделями классификаторов

Table 8. Experimental data on classification of the severity of pneumonia on a control sample using various classifier models

Обследуемые	Гибридный нейросетевой классификатор, %			Классификатор NFN, %		
	ДЧ	ДС	ДЭ	ДЧ	ДС	ДЭ
$n_{\omega_0} = 25$	84	88	86	72	76	74
$n_{\omega_1} = 25$	88	84		76	72	

Таким образом, учет риска коморбидного заболевания на примере ИБС при определении степени тяжести ВБП позволил повысить показатели качества классификации более чем на 10% по всем показателям качества классификации степени тяжести пневмонии.

Выводы

1. При учете влияния коморбидных заболеваний на степень тяжести внебольничной пневмонии целесообразно определять как риск самого

коморбидного заболевания, так и степень тяжести (кластер) внебольничной пневмонии. Эта процедура может быть реализована посредством гибридного нейронечеткого классификатора, в основе которого положена гибридная нейронечеткая сеть, содержащая три макрослоя, построенных на парадигме вероятностных нейронных сетей и на парадигме нечеткого логического вывода.

2. Сформированы технические требования для системы поддержки принятия врачебных решений по оценки

степени тяжести внебольничной пневмонии. Согласно этим требованиям разработана структура системы поддержки принятия врачебных решений, предназначенная для мониторинга степени тяжести внебольничной пневмонии и оценки эффективности ее лечения. В систему интегрированы три решающих модуля, позволяющие осуществлять контроль степени тяжести внебольничной пневмонии с учетом коморбидности, контроль эффективности плана лечения и модуль дифференциальной диагностики, позволяющий определять этиологию заболевания.

3. Для классификации риска ИБС у больных внебольничной пневмонией предложен гибридный классификатор с иерархической структурой, на нижнем иерархическом уровне которого включены четыре «слабых» классификатора, построенные на основе нечеткого логического вывода. На верхнем иерархическом уровне гибридного классификатора включена полносвязная нейронная сеть с дополнительным входом, полученным посредством модели виртуаль-

ного потока. Апробация гибридного классификатора риска ИБС позволяет рекомендовать его использовать в гибридном нейронечетком классификаторе для определения степени тяжести внебольничной пневмонии у коморбидных больных с сердечно-сосудистыми заболеваниями.

4. Осуществлена сравнительная оценка показателей качества классификации степени тяжести пневмонии двух моделей разработанного гибридного нейронечеткого классификатора: с гибридным классификатором ишемического риска и без гибридного классификатора ишемического риска, с известной регрессионной моделью степени тяжести внебольничной пневмонии. Эксперименты показали, что включение в гибридный нейронечеткий классификатор степени тяжести внебольничной пневмонии гибридного классификатора ишемического риска позволяет повысить качество оценки степени тяжести внебольничной пневмонии более чем на 10% по всем показателям качества.

Список литературы

1. Внебольничная пневмония у взрослых: практические рекомендации по диагностике, лечению и профилактике (пособие для врачей) / А. Г. Чучалин, А. И. Синопальников, Р. С. Козлов [и др.] // Клиническая микробиология и антимикробная химиотерапия. 2010. Т. 12, № 3. С. 186–225.
2. Клинические рекомендации по диагностике, лечению и профилактике тяжелой внебольничной пневмонии у взрослых / А. Г. Чучалин, А. И. Синопальников, Р. С. Козлов [и др.] // Пульмонология. 2014. № 4. С. 13–48. <https://doi.org/10.18093/0869-0189-2014-0-4>.
3. Создание прогностической модели для оценки степени тяжести внебольничной пневмонии / Ю. А. Рогожкина, Т. А. Мищенко, Л. М. Малишевский [и др.] // Бюллетень

физиологии и патологии дыхания. 2019. Т. 1, № 71. С. 45–50. https://doi.org/10.12737/article_5c898b1674b5d2.31350435.

4. Сиротко И. И., Самойлов Р. Г. Математические модели внебольничной пневмонии // Сибирский медицинский журнал. 2007. № 2. С. 5–10.

5. Использование гибридных нейросетевых моделей для многоагентных систем классификации в гетерогенном пространстве информативных признаков / А. Г. Курочкин, В. В. Жилин, С. А. Филист, С. А. Суржикова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2015. Т. 3, № 31. С. 85–95.

6. Нейросетевые модели для метаанализа медико-экологических данных / А. Г. Курочкин, В. В. Протасова, С. А. Филист, А. Н. Шуткин // Нейрокомпьютеры. Разработка, применение. 2015. № 6. С. 42–48.

7. Распределенные автономные интеллектуальные агенты для мониторинга и метаанализа эффективности управления живыми системами / Т. В. Петрова, А. А. Кузьмин, Д. Ю. Савинов, В. В. Серебровский // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2017. Т. 4, № 40. С. 61–73.

8. Способ моделирования нечетких моделей в пакете MATLAB для биомедицинских приложений / В. В. Жилин, С. А. Филист, Р. С. Халед Абдул, О. В. Шаталова // Медицинская техника. 2008. № 2. С. 15–18.

9. Жилин В. В., Филист С. А., Аль-Муаалеми В. А. Гибридный способ классификации биосигналов на основе технологий нечеткой логики принятия решений и нейронных сетей // Биомедицинская радиоэлектроника. 2009. № 5. С. 77–82.

10. Интеллектуальные информационные системы для мониторинга эффективности лекарственных назначений и терапевтических процедур / С. А. Филист, Т. В. Петрова, К. В. Подмастерьев, О. В. Шаталова // Нейрокомпьютеры и их применение: тезисы докладов XVI Всероссийской научной конференции (13 марта 2018 г.). М.: Московский государственный психолого-педагогический университет, 2018. С. 74–77.

11. Нейросетевые модели для метаанализа медико-экологических данных / А. Г. Курочкин, В. В. Протасова, С. А. Филист [и др.] // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2015. № 6. С. 48–53.

12. Алгоритмы мониторинга эффективности терапевтических и реабилитационных процедур по показателям клинического анализа крови в системе поддержки принятия врачебных решений / А. В. Бутусов, А. В. Киселев, Е. В. Петрунина, Р. И. Сафронов, В. В. Песок, А. Е. Пшеничный // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 1. С. 170–190. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-170-190>.

13. Филист С. А., Шаталова О. В., Ефремов М. А. Гибридная нейронная сеть с макрослоями для медицинских приложений // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2014. № 6. С. 35–39.
14. Нейросетевой решающий модуль для исследования живых систем / С. Г. Емельянов, А. Ф. Рыбочкин, С. А. Филист, А. Р. Халед // Известия Курского государственного технического университета. 2008. Т. 2, № 23. С. 77–82.
15. Филист С. А., Шуткин А. Н., Уварова В. В. Структурно-функциональная модель метаанализа медико-экологических данных // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 8-1 (19-1). С. 364–367. <https://doi.org/10.12737/15449>.
16. Программное обеспечение интеллектуальной системы классификации форменных элементов крови / Р. А. Томакова, С. А. Филист, В. В. Жилин [и др.] // Фундаментальные исследования. 2013. № 10, ч. 2. С. 303–307.
17. Моросанова Н. А., Соловьев С. Ю. Формальные свойства схемы Шортлиффа // Управление большими системами. 2012. № 36. С. 5–38.
18. Mobile Health Devices as Tools for Worldwide Cardiovascular Risk Reduction and Disease Management / J. D. Piette, J. List, G. K. Rana [et al.] // Circulation. 2015. Vol. 132, N 21. P. 2012–2027. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.114.008723>.
19. Фисенко О. В., Синопальников А. И. Тяжелая внебольничная пневмония и шкалы оценки прогноза // Практическая пульмонология. 2014. № 2. С. 20–26.
20. Возможности прогнозирования повторного инфаркта миокарда у больных трудоспособного возраста / Е. А. Шишкина, О. В. Хлынова, А. В. Туев [и др.] // Российский кардиологический журнал. 2020. Т. 25, № 8. С. 69–74. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2020-3909>.
21. Комплексная оценка уровня психоэмоционального напряжения / Н. А. Кореневский, О. И. Филатова, М. И. Лукашов, Р. А. Крупчатников // Биомедицинская радиоэлектроника. 2009. № 5. С. 4–9.
22. Ермаков С. А., Болгов А. А. Оценка риска с использованием нейро-нечеткой системы // Информация и безопасность. 2022. Т. 25, № 4. С. 583–592. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.25.4.012>.
23. Виртуальные потоки в гибридных решающих модулях классификации сложноструктурируемых данных / А. В. Киселев, Д. Ю. Савинов, С. А. Филист, О. В. Шаталова, В. В. Жилин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2018. Т. 2, № 42. С. 137–149.
24. Модели латентных предикторов в интеллектуальных системах прогнозирования состояния живых систем / А. В. Киселев, О. В. Шаталова, З. У. Протасова, С. А. Филист, Н. С. Стадниченко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 114–133.

25. Нейросетевые модули с виртуальными потоками для классификации и прогнозирования функционального состояния сложных систем / А. В. Киселев, Т. В. Петрова, С. В. Дегтярев, А. Ф. Рыбочкин, С. А. Филист, О. В. Шаталова, В. Н. Мишустин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 4(79). С. 123–134. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-4-123-134>.

26. Слабые классификаторы с виртуальными потоками в интеллектуальных системах прогнозирования сердечно-сосудистых осложнений / А. В. Киселев, М. В. Томаков, Е. В. Петрунина [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 1(30). С. 6–19.

References

1. Chuchalin A. G., Sinopal'nikov A. I., Kozlov R. S., eds. Vnebol'nichnaya pnevmoniya u vzroslyh: prakticheskie rekomendatsii po diagnostike, lecheniyu i profilaktike (Posobie dlya vrachej) [Community-acquired pneumonia in adults: practical recommendations for diagnosis, treatment and prevention (A manual for doctors)]. *Klinicheskaya mikrobiologiya i antimikrobnaya himioterapiya = Clinical Microbiology and Antimicrobial Chemotherapy*, 2010, vol. 12, no. 3, pp. 186–225.

2. Chuchalin A. G., Sinopal'nikov A. I., Kozlov R. S., eds. Klinicheskie rekomendatsii po diagnostike, lecheniyu i profilaktike tyazhelej vnebol'nichnoj pnevmonii u vzroslyh [Clinical guidelines on diagnosis, treatment and prevention of severe community-acquired pneumonia in adults]. *Pul'monologiya = Pulmonology*, 2014, no. 4, pp. 13–48. <https://doi.org/10.18093/0869-0189-2014-0-4>

3. Rogozhkina Yu. A., Mishchenko T. A., Malishevskij L. M., eds. Sozdanie prognosticheskoy modeli dlya otsenki stepeni tyazhesti vnebol'nichnoj pnevmonii [The creation of predictive models for assessing the severity of community-acquired pneumonia]. *Byulleten' fiziologii i patologii dyhaniya = Bulletin of Physiology and Pathology of Respiration*, 2019, vol. 1, no. 71, pp. 45–50. https://doi.org/10.12737/article_5c898b1674b5d2.31350435

4. Sirotko I. I., Samojlov R. G. Matematicheskie modeli vnebol'nichnoj pnevmonii [Mathematical models of predicting course of community-acquired pneumonia in young persons]. *Sibirskij meditsinskij zhurnal = Siberian Medical Journal*, 2007, no. 2, pp. 5–10.

5. Kurochkin A. G., Zhilin V. V., Filist S. A., Surzhikova S. A. Ispol'zovanie gibridnyh nejrosetevykh modelej dlya mnogoagentnykh sistem klassifikatsii v geterogennom prostranstve informativnykh priznakov [Use of hybrid neural network models for multi-agent classification systems in heterogeneous space of informative signs]. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2015, vol. 3, no. 31, pp. 85–95.

6. Kurochkin A. G., Protasova V. V., Filist S. A., Shutkin A. N. Nejrosetevye modeli dlya metaanaliza mediko-ekologicheskikh dannyh [Neural network models for metaanalysis of medical and environmental data]. *Nejrokomp'yutery. Razrabotka, primenenie = Neurocomputers. Development, Application*, 2015, no. 6, pp. 42–48.

7. Petrova T. V., Kuz'min A. A., Savinov D. Yu., Serebrovskij V. V. Raspredelemnnye avtonomnye intellektual'nye agenty dlya monitoringa i meta-analiza effektivnosti upravleniya zhivymi sistemami [Distributed autonomous intellectual agents for monitoring and metaanalysis of living systems management effectiveness]. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2017, vol. 4, no. 40, pp. 61–73.

8. Zhilin V. V., Filist S. A., Haled Abdul R. S., Shatalova O. V. Sposob modelirovaniya nechetkih modelej v pakete MATLAB dlya biomeditsinskih prilozhenij [A method for modeling fuzzy models in the MATLAB package for biomedical applications]. *Meditinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2008, no. 2, pp. 15–18.

9. Zhilin V. V., Filist S. A., Al'-Muaalemi V. A. Gibridnyj sposob klassifikatsii biosignalov na osnove tekhnologij nechetkoj logiki prinyatiya reshenij i nejronnyh setej [Hybrid method of classification of biosignals based on fuzzy decision logic and neural networks technologies]. *Biomeditsinskaya Radioelektronika = Biomedicine Radioengineering*, 2009, no. 5, pp. 77–82.

10. Filist S. A., Petrova T. V., Podmaster'ev K. V., Shatalova O. V. [Intelligent information systems for monitoring the effectiveness of medicinal prescriptions and therapeutic procedures]. *Nejrokomp'yutery i ih primenenie. Tezisy dokladov XVI Vserossijskoj nauchnoj konferentsii (13 marta 2018 g.)* [Neurocomputers and their application: Abstracts of the XVI All-Russian Scientific Conference (March 13, 2018)]. Moscow, Moscow State Psychological and Pedagogical University Publ., 2018, pp. 74–77. (In Russ.)

11. Kurochkin A. G., Protasova V. V., Filist S. A., eds. Nejrosetevye modeli dlya metaanaliza mediko-ekologicheskikh dannyh [Neural network models for meta-analysis of medical and environmental data]. *Nejrokomp'yutery: razrabotka, primenenie = Neurocomputers. Development, Application*, 2015, no. 6, pp. 48–53.

12. Butusov A. V., Kiselev A. V., Petrunina E. V., Safronov R. I., Pesok V. V., Pshenichnyj A. E. Algoritmy monitoringa effektivnosti terapevticheskikh i reabilitatsionnyh protsedur po pokazatelyam klinicheskogo analiza krovi v sisteme podderzhki prinyatiya vrachebnyh reshenij [Algorithms for Monitoring the Effectiveness of Therapeutic and Rehabilitation Procedures Based on Clinical Blood Analysis Indicators in the Medical Decision Support System]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 170–190. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-170-190>.

13. Filist S. A., Shatalova O. V., Efremov M. A. Gibridnaya nejronnaya set' s makrosloyami dlya meditsinskih prilozhenij [Hybrid neural network with macro layers for medical applications]. *Nejrokompyutery: razrabotka, primenenie = Neurocomputers. Development, Application*, 2014, no. 6, pp. 35–39.
14. Emel'yanov S. G., Rybochkin A. F., Filist S. A., Haled A. R. Nejrosetevoy reshayushchij modul' dlya issledovaniya zhivyh system [Neural network solving module for the study of living systems]. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of the Kursk State Technical University*, 2008, vol. 2, no. 23, pp. 77–82.
15. Filist S. A., Shutkin A. N., Uvarova V. V. Strukturno-funktsional'naya model' metaanaliza mediko-ekologicheskikh dannyh [Structural and functional model of meta-analysis of medical and environmental data]. *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika = Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*, 2015, vol. 3, no. 8–1 (19–1), pp. 364–367. <https://doi.org/10.12737/15449>
16. Tomakova R. A., Filist S. A., Zhilin V. V., eds. Programmnoe obespechenie intellektual'noj sistemy klassifikatsii formennyh elementov krovi [Software intellectual system of classification of formed elements of blood]. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2013, no. 10, pt. 2, pp. 303–307.
17. Morosanova N. A., Solov'ev S. Yu. Formal'nye svoystva skhemy Shortliffa [Formal properties of the Shortlife scheme]. *Upravlenie bol'shimi sistemami = Managing Large Systems*, 2012, no. 36, pp. 5–38.
18. Piette J. D., List J., Rana G. K., eds. Mobile Health Devices as Tools for Worldwide Cardiovascular Risk Reduction and Disease Management. *Circulation*, 2015, vol. 132, no. 21, pp. 2012–2027. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.114.008723>
19. Fisenko O. V., Sinopal'nikov A. I. Tyazhelaya vnebol'nichnaya pnevmoniya i shkaly otsenki prognoza [Severe community-acquired pneumonia and prognosis assessment scales]. *Prakticheskaya pul'monologiya = Practical Pulmonology*, 2014, no. 2, pp. 20–26.
20. Shishkina E. A., Hlynova O. V., Tuev A. V., eds. Vozmozhnosti prognozirovaniya povtornogo infarkta miokarda u bol'nyh trudosposobnogo vozrasta [Prediction of recurrent myocardial infarction in working-age patients]. *Rossijskij kardiologicheskij zhurnal = Russian Journal of Cardiology*, 2020, vol. 25, no. 8, pp. 69–74. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2020-3909>
21. Korenevskij N. A., Filatova O. I., Lukashov M. I., Krupchatnikov R. A. Kompleksnaya otsenka urovnya psihoemotsional'nogo napryazheniya [Comprehensive assessment of the level of psycho-emotional stress]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedicine Radioengineering*, 2009, no. 5, pp. 4–9.
22. Ermakov S. A., Bolgov A. A. Otsenka riska s ispol'zovaniem nejro-nechetkoj sistemy [Risk assessment using a neuro-fuzzy system]. *Informatsiya i bezopasnost' = Information and Security*, 2022, vol. 25, no. 4, pp. 583–592. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.25.4.012>

23. Kiselev A. V., Savinov D. Yu., Filist S. A., Shatalova O. V., Zhilin V. V. Virtual'nye potoki v gibridnyh reshayushchih modulyah klassifikatsii slozhnostrukturiruemym dannym [Virtual flows in hybrid decision modules of classification of complex-structured data]. *Pri-kaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Control and High Technologies*, 2018, vol. 2, no. 42, pp. 137–149.

24. Kiselev A. V., Shatalova O. V., Protasova Z. U., Filist S. A., Stadnichenko N. S. Modeli latentnyh prediktorov v intellektual'nyh sistemah prognozirovaniya sostoyaniya zhivyh sistem [Models of Latent Predictors in Intellectual Systems for Forecasting the State of Living 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, vol. 10, no. 1, pp. 114–133.

25. Kiselev A. V., Petrova T. V., Degtyarev S. V., Rybochkin A. F., Filist S. A., Shatalova O. V., Mishustin V. N. Nejrosetevye moduli s virtual'nymi potokami dlya klassifikatsii i prognozirovaniya funktsional'nogo sostoyaniya slozhnyh sistem [Hybrid Deciding Modules with Virtual Streams for Classification and Prediction of Functional State of Complex Systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 4(79), pp. 123–134. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-4-123-134>.

26. Kiselev A. V., Tomakov M. V., Petrunina E. V., eds. Slabye klassifikatory s virtual'nymi potokami v intellektual'nyh sistemah prognozirovaniya serdechno-sosudistykh oslozhnenij [The prediction of cardiovascular complications with the help of weak classifiers with virtual streams in intelligent 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*, 2019, vol. 9, no. 1 (30), pp. 6–19.

Информация об авторах / Information about the Authors

Петрунина Елена Валерьевна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой СМАРТ-технологий, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: isu@mospolytech.ru, ORCID: 0000-0003-3661-0778

Elena V. Petrunina, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of SMART Technologies, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, e-mail: isu@mospolytech.ru, ORCID: 0000-0003-3661-0778

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

Шульга Леонид Васильевич, доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры охраны труда и окружающей среды, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: otios@mail.ru

Песок Валерия, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: lera.pesok@mail.ru

Алавси Хайдер Али Хуссейн, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: book.hp.2015@gmail.com

Бутусов Андрей Владимирович, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mustang2004@list.ru, ORCID: 0009-0008-5307-7956

Sergey A. Filist, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: SFilist@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1358-671X

Leonid V. Shulga, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Professor of the Department of Occupational Safety and Environment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: otios@mail.ru

Valeriya V. Pesok, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: lera.pesok@mail.ru

Hayder Ali H. Alawsi, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering of Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: book.hp.2015@gmail.com

Andrey V. Butusov, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mustang2004@list.ru, ORCID: 0009-0008-5307-7956

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-54-69>



УДК 004.946

Подготовка специалистов по радиационному виду неразрушающего контроля с применением цифровых технологий

В. С. Кувшинников¹, Е. Е. Ковшов¹ ✉

¹ АО «НИКИМТ – Атомстрой»

Алтуфьевское шоссе, д. 43/2, г. Москва 127410, Российская Федерация

✉ e-mail: KovshovEE@atomrus.ru

Резюме

Целью исследования является разработка прикладного программного обеспечения, включая VR-технологии, для увеличения числа подготавливаемых специалистов по радиационному виду неразрушающего контроля за счет снижения удельной нагрузки на радиографические лаборатории при сохранении объемов практических занятий, приобретаемых компетенций и формируемых профессиональных навыков.

Методы. Рассмотрены основные факторы востребованности симулятора промышленной радиографии применительно к практической части образовательного цикла. Выделены наиболее значимые аспекты практической подготовки, доступные для их виртуальной реализации. Представлены результаты программной реализации математических моделей физических и физико-химических процессов ионизирующего излучения в контексте формирования цифрового двойника радиографического изображения.

Результаты. Выполнена практическая реализация дидактических материалов в виде программно-аппаратного VR-симулятора в составе цифровой образовательной среды для решения задач обучения, переподготовки, подготовки к аттестации персонала и предоставления допуска специалистов к выполнению работ по радиационному виду неразрушающего контроля на объектах. Исследованы физические и технологические аспекты, выполнены моделирование, алгоритмизация и программная реализация VR-симулятора. Результаты апробации учебных программ с интеграцией занятий в VR-симуляторе промышленной радиографии показали, что общее время практики обучающихся увеличивается на 30–65% при одновременном сокращении загруженности радиографической лаборатории более чем на 25%.

Заключение. Применение предложенного подхода позволит сократить экологические и медико-биологические риски за счет редуцирования требований к безопасности занятий с применением программно-аппаратного решения. Автоматизация процедур формирования тестовых заданий и контроля знаний на основе программных инструментальных средств и применения математических моделей, включая методы искусственного интеллекта, позволит достигнуть сокращения сроков обучения и поспособствует дальнейшему увеличению числа подготовленных специалистов по различным видам и методам неразрушающего контроля.

Практическая полезность разработки цифровой виртуальной среды раскрывается благодаря переносу и масштабированию полученного программно-аппаратного решения на другие виды и методы неразрушающего контроля согласно ГОСТ Р 56542-2019.

Ключевые слова: компьютерное обучение; виртуальная реальность; цифровые и информационные технологии; программный симулятор; рентгеновское изображение.

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

Для цитирования: Кувшинников В. С., Ковшов Е. Е. Подготовка специалистов по радиационному виду неразрушающего контроля с применением цифровых технологий // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 54–69. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-54-69>.

Поступила в редакцию 16.10.2023

Подписана в печать 14.11.2023

Опубликована 22.12.2023

Specialists Training for the Radiation Type of Non-Destructive Testing Based on Digital Technologies

Vladimir S. Kuvshinnikov¹, Evgeniy E. Kovshov¹✉

¹ JSC "NIKIMT – Atomstroy"

43/2 Altufevskoe highway, Moscow 127410, Russian Federation

✉ e-mail: KovshovEE@atomrus.ru

Abstract

The purpose of research is the development of application software, including VR-technologies, to increase the number of trained specialists in radiation type of nondestructive testing by reducing the per capita load on radiographic laboratories while maintaining the amount of practical training, acquired competencies and formed relevant professional skills.

Methods. Prerequisites for virtualization of the process of training specialists in nondestructive testing of structural materials and fabricated products are defined. The main factors of demand for industrial radiography simulator in relation to the practical part of the educational cycle on radiation type of nondestructive testing are considered. As a result of the analysis the most significant aspects of practical training, available for their virtual realization, are singled out. The results of software implementation of mathematical models of physical and physicochemical processes of ionizing radiation, attenuation and absorption of penetrating radiation within the scope of digital twin of radiographic image generation as a result of simulation of the technological process of radiation type of nondestructive testing are presented.

Results. Performed practical implementation of didactic materials in the form of hardware and software VR-simulator as part of digital educational environment to solve the problems of training, retraining, preparation for certification of personnel and providing admission of specialists to work on radiation type of nondestructive testing at facilities. Physical and technological aspects are analyzed, modeling, algorithmization and software implementation of VR-simulator are performed. A comprehensive approach to the creation of a learning environment with the use of digital technologies is presented. Considered are the main components, their goals and objectives. The structure of a practical lesson and illustrations of the training process in a virtual environment are given. The results of approbation of training programs with integration of classes in VR-simulator of industrial radiography have shown that the total time of practice of trainees increases by 40-55% with simultaneous reduction of per capita radiographic laboratory load by more than 25%. The main directions of development and scaling of software and hardware solution using VR-technologies are given.

Conclusion. The developed and tested hardware-software solution together with the results of scientific research suggests the possibility of application and development directions of the digital educational system with VR-environment. The proposed approach application will allow to reduce environmental and biomedical risks by reducing the requirements to safety of training with the use of software and hardware solution. Automation of testing task generation and knowledge control procedures on the basis of software tools and mathematical models application, including methods

of artificial intelligence, will allow to achieve training term reduction and will contribute to further increase in the number of trained specialists in various types and methods of nondestructive testing.

With the functional capabilities expansion and evolutionary development of hardware-software solution (industrial radiography simulator) on the basis of unified modular approach, software libraries and hardware-software interfaces, virtual simulator simplifies organization of the process of specialists training and knowledge control. Practical value of the digital virtual environment (VR-environment) development is revealed due to the transfer and scaling of the obtained hardware-software solution to other types and methods of nondestructive testing according to GOST R 56542-2019 "Non-destructive testing. Classification of types and method".

Keywords: computer training; virtual reality; digital and information technologies; software simulator; X-ray image.

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

For citation: Kuvshinnikov V. S., Kovshov E. E. Specialists Training for the Radiation Type of Non-Destructive Testing Based on Digital Technologies. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(4): 54–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-54-69>.

Received 16.10.2023

Accepted 14.11.2023

Published 22.12.2023

Введение

Развитие отраслей промышленного производства связано с планомерным процессом усовершенствования известных методов контроля, а также с созданием и развитием новых видов и методов неразрушающего контроля, требующих инновационных подходов к обучению. В настоящее время вычислительная техника надёжно зарекомендовала себя как полезный и эффективный инструмент в образовании. Мировая практика наглядно демонстрирует, что на сегодняшний день применение информационных технологий весьма актуально в обучении персонала различным рабочим и инженерным профессиям [1; 2; 3]. Цифровые тренажёры на основе виртуальной реальности позволяют существенно расширить перечень решаемых при обучении задач и улучшить качество усвоения материала, задействуя зрительную, слуховую (аудиальную) и

двигательную (моторную) память. Таким образом очевиден потенциал применения VR-технологий в программах подготовки технических специалистов для специальностей, сопряженных с профессиональной опасностью и высокими требованиями к компетенциям и трудовым навыкам сотрудников.

Неразрушающий контроль (НК) играет важную роль в современном промышленном комплексе. В настоящее время технологии неразрушающего контроля активно модернизируются и обновляются в рамках концепции NDT 4.0 [4; 5; 6]. Совершенствование технического оснащения специалистов не может происходить отдельно от усовершенствований в программах их подготовки и переподготовки. В процессе исследований выявлен ряд недостатков широко распространённого аудиторного метода обучения НК [7].

В ходе обучения и контроля знаний, как правило, используются образцы, выполненные в металле, и физическое, действующее технологическое оборудование. При этом основной задачей является повышение эффективности обучения и контроля знаний обучающегося за счет сокращения материальных и временных затрат на весь цикл обучения, благодаря использованию в первую очередь цифровых образовательных ресурсов в виде подготовленных и загруженных в персональный ЭВМ дидактических материалов, цифровых двойников объектов контроля и технологического

оборудования для их неразрушающего контроля в VR-среде.

Радиационный контроль (РК) – один из самых распространённых видов неразрушающего контроля в сфере машиностроительного производства и энергетики [8]. В связи с этим в качестве приоритетного с точки зрения образования в VR-среде рассматривался радиационный вид неразрушающего контроля с радиографическим способом получения первичной информации как один из наиболее востребованных и широко применяемых в промышленности (рис. 1).

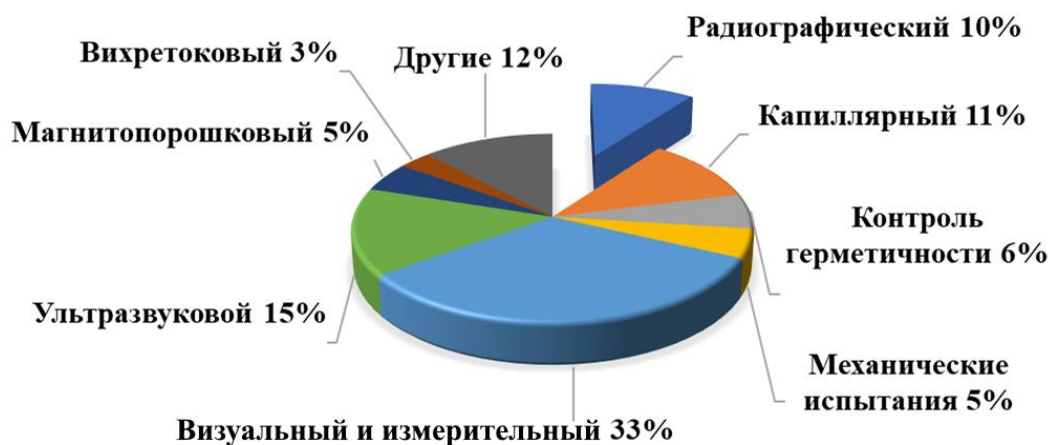


Рис. 1. Востребованность в аттестации по НК, РК и другим методам испытаний (2020 год)

Fig. 1. Demand for certification in NDT, RC and other testing methods (2020)

Немаловажно, что в отличие от методов визуального и измерительного, ультразвукового контроля радиографический метод, использующий ионизирующее излучение, несет больше угроз для здоровья человека и окружающей среды, что затрудняет увеличение практической составляющей образовательного процесса.

Материалы и методы

Одну из составных частей цифровой образовательной среды, предназначенной для обучения и повышения квалификации специалистов НК, составляет система управления обучением как функциональная часть цифровой образовательной среды [9]. Среди её задач – обеспечение учащихся и преподавателей возможностью удалённого доступа к

образовательным ресурсам и сервисам. Преподаватели также получают более удобный контроль за усвоением материала и успеваемостью обучаемых, эффективный инструмент для онлайн-семинаров и лекционных занятий. Платформа упрощает учёт результатов аудиторных и лабораторных занятий, включая практику в AR/VR-лабораториях. Согласно данным опроса, применение цифровых образовательных сред в задачах обучения стало на сегодняшний день объективной реальностью [10].

Планомерный перевод образовательного процесса на цифровой формат связан с трансформацией учебных планов и программ [11; 12; 13]. В ходе проведённого исследования сформулированы требования к переработке ряда методических и дидактических материалов. Для подготовки специалистов к аттестации по радиационному виду НК подготовлена новая образовательная программа, в которой из 10 практических занятий 7 включают работу в виртуальной среде тренажёра промышленной радиографии. Сегодня технологии виртуальной и дополненной реальности находят применение не только в части теории, но и в практике НК [14; 15]. Начиная со знакомства с технологией виртуальной реальности, обучаемым демонстрируются цифровые двойники объектов контроля и вспомогательного оборудования, предлагается возможность самостоятельного выполнения ряда специально разработанных тренировочных

заданий, закрепляющих теоретическую часть по мере прохождения всего курса подготовки.

Таким образом, с помощью VR-системы в виде симулятора решается задача проведения практических занятий в помещении, оборудованном системой виртуальной реальности (виртуальной лаборатории). При этом в полной мере могут быть оценены такие важные аспекты действий обучаемого, как: соблюдение корректной и безопасной последовательности работ при выполнении контроля; корректный выбор индикаторов и маркеров; правильный выбор схемы контроля объекта; корректное размещение и позиционирование как объекта контроля, так и источника рентгеновского излучения; соблюдение требований правил безопасности при работе с излучателями ионизирующего излучения; контроль соблюдения требований к срокам поверки оборудования и другие аспекты, влияющие на эффективность и безопасность труда, а также успешное прохождение аттестационных испытаний.

VR-симулятор направлен на предоставление доступной практики при переобучении специалистов согласно новым требованиям и стандартам нормативно-технической документации, например стандартам серии ISO [16; 17].

Практическое занятие в виртуальной лаборатории проходит в несколько этапов. Структура занятия отражена ниже (рис. 2).

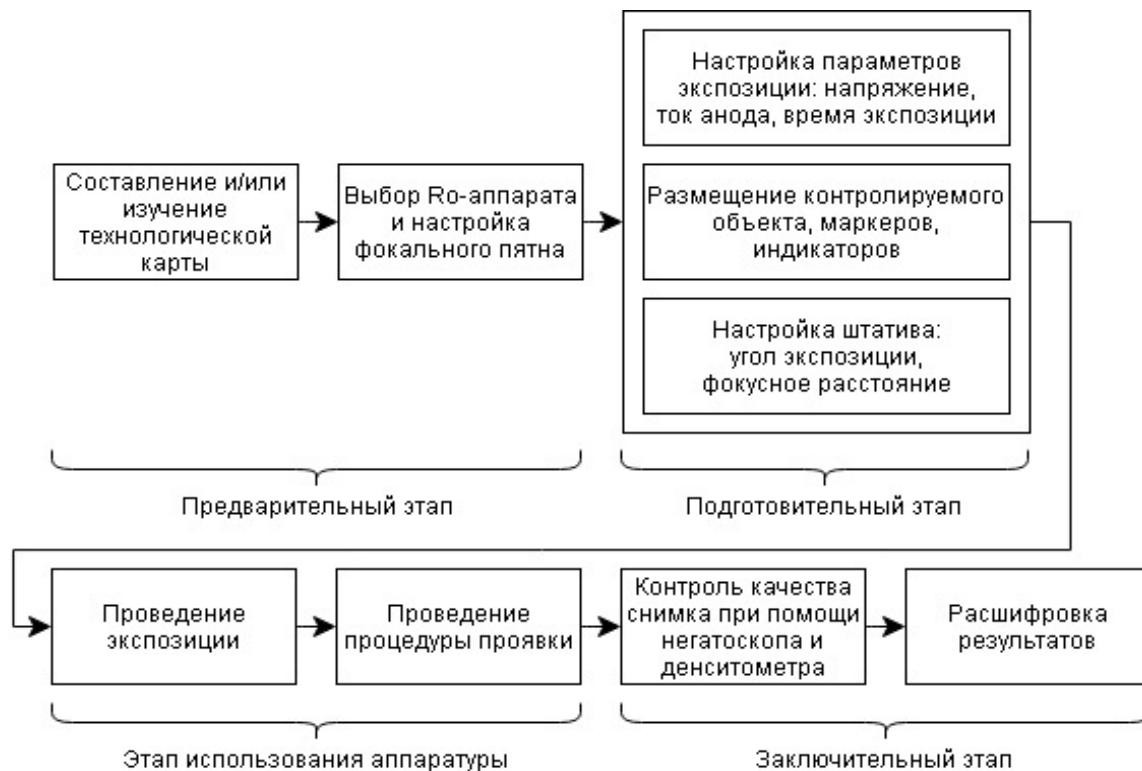


Рис. 2. Этапы практического занятия

Fig. 2. Practical session stages

На предварительном этапе составляется новая или изучается ранее разработанная маршрутно-операционная и/или технологическая карта, осуществляется выбор контролируемого образца, рентгеновского аппарата, схема контроля объекта (рис. 3).

Подготовительный этап включает определение таких параметров, как напряжение, ток анода и время экспозиции. Вручную (с использованием моторной памяти) проводится размещение виртуального объекта контроля, маркеров и индикаторов, настройка штатива рентгеновского аппарата (рис. 4).

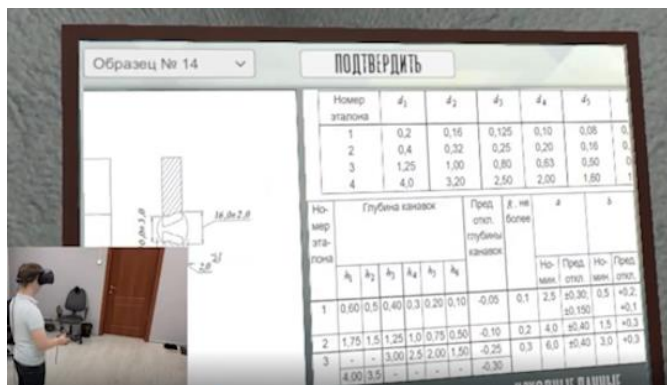


Рис. 3. Выбор контролируемого образца [7]

Fig. 3. Test sample selection [7]





Рис. 4. Элементы настройки экспозиции [7]

Fig. 4. Exposure adjustment elements [7]

В ходе подготовительного этапа обучаемый демонстрирует знания теории и практику работы с технической документацией по объекту контроля, рентгеновскому аппарату и детектору, умение выбрать сочетание параметров и рассчитать время экспозиции в соответствии со схемой контроля.

Далее проводится экспонирование с получением изображения на виртуальном детекторе, а в случае использования

фотопленки в качестве виртуального аналогового детектора требуется взаимодействие с виртуальной проявочной машиной. При этом контролируется режим химической обработки фотоматериала, проверяется неукоснительное соблюдение техники безопасности при работе с объектами повышенной опасности и травматизма [9]. Рассмотрим пример индикатора закрытия рентгенозащитной двери (рис. 5).



Рис. 5. Индикаторы соблюдения требований безопасности

Fig. 5. Indicators of safety compliance

На заключительном этапе оцениваются количественные и качественные характеристики полученного изображения с применением вспомогательного оборудования – негатоскопа и денситометра, выполняется расшифровка результатов рентгенограммы. При контроле качества

рентгенограммы особое внимание уделяется контрастности полученного изображения, показателям оптической плотности на участках расчётной контролируемой толщины образца, а также общей различающей способности полученного снимка (рис. 6).

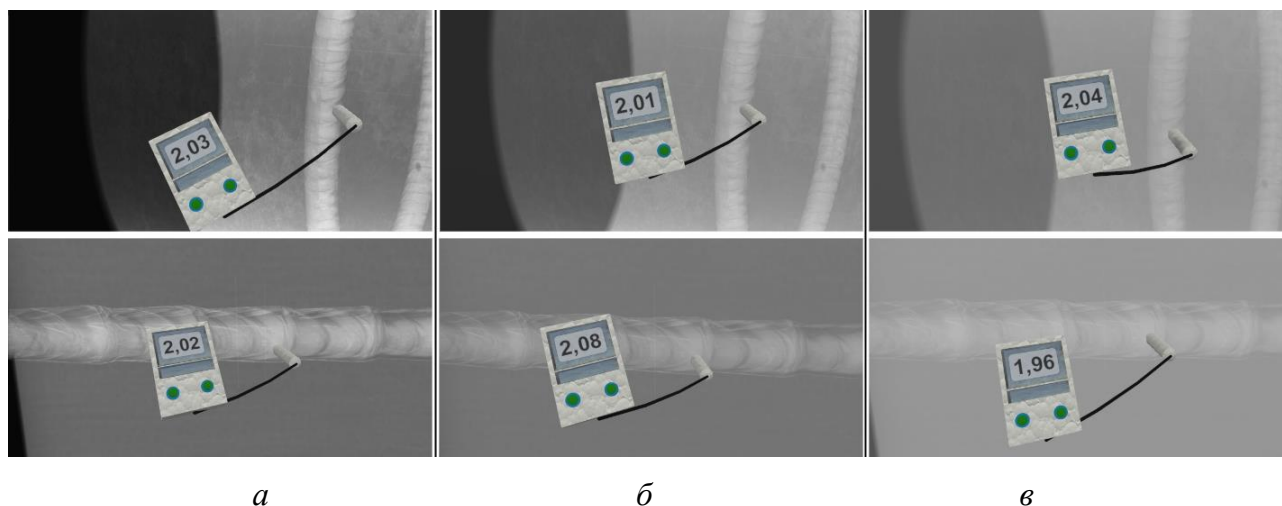


Рис. 6. Оценка оптической плотности участка смоделированных в VR-среде рентгенограмм с проволочными индикаторами чувствительности: *а* – рекомендуемое напряжение; *б* – нижний предел напряжения; *в* – верхний предел напряжения

Fig. 6. Area optical density estimation of VR-modeled radiographic images with wire quality indicators: *a* – recommended voltage; *b* – lower voltage limit; *v* – upper voltage limit

На рисунке 6 показано влияние настроек рентгеновского аппарата на качественные и количественные характеристики получаемого изображения, представлены образцы стыковых сварных соединений двух типов – плоские и кольцевые. Напряжение, анодный ток и время экспозиции устанавливаются в соответствии с номограммой и параметрами технологической карты аппарата.

Следует отметить, что для получения требуемых количественных и качественных характеристик рентгенограммы обучаемый выполняет расчет

параметров экспонирования в соответствии с нелинейными характеристиками детекторов, определяемыми в лабораторных условиях [18] и приводимыми в нормативной и технической документации. Ошибки в разработке технологической карты, выборе схемы контроля или в настройке параметров экспонирования проявляются на этапе контроля качества рентгенограммы. Для того чтобы обучаемый получил представление о последствиях наиболее распространённых ошибок, VR-симулятор оснащён функцией генерации реалистичных радиографических снимков (рис. 6–8).



Рис. 7. Схема взаимодействия цифровых двойников при симуляции РК

Fig. 7. Scheme of digital twin interaction during RC simulation

Формирование изображения производится на основе физически достоверных закономерностей средствами среды интерактивной машинной графики с использованием программ-шейдеров. В результате поэтапной обработки вершин

и фрагментов изображения производится оценка интенсивности прошедшего излучения по формуле

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot \delta}, \quad (1)$$

где I , I_0 – выходная и начальная интенсивности рентгеновского излучения; e – число Непера; μ – линейный коэффициент ослабления материала; δ – толщина материала [9].

Ослабление интенсивности рентгеновских лучей в материале объекта контроля связано с несколькими процессами: с истинным поглощением фотонов (фотоэлектрический эффект), с рассеянием (когерентное и некогерентное) и с парным взаимодействием. Зависимость коэффициента ослабления от энергии частицы [19] описывается нелинейной немонотонной функцией (рис. 9).

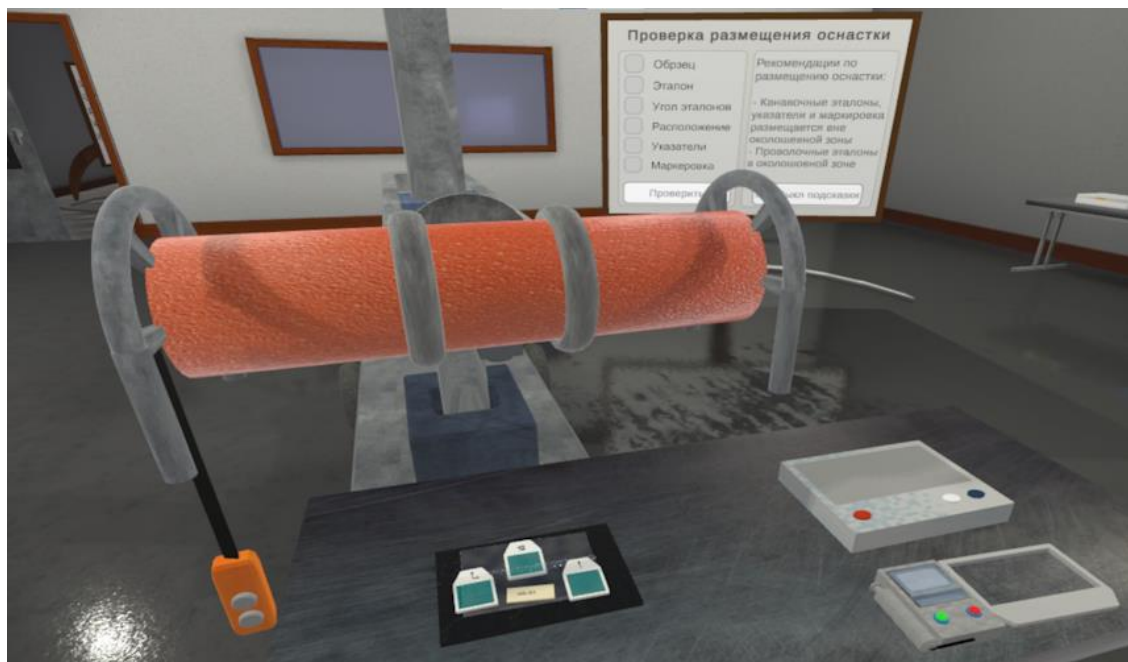


Рис. 8. Организация рабочего стола виртуальной лаборатории РК

Fig. 8. Virtual RC laboratory workbench design

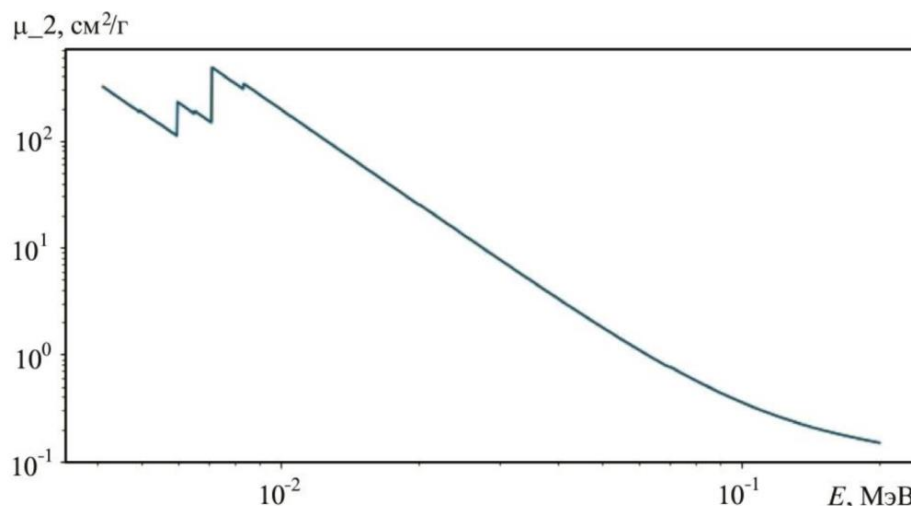


Рис. 9. Зависимость коэффициента массового ослабления от энергии частицы

Fig. 9. Mass attenuation coefficient dependence on particle energy

Линейный коэффициент ослабления выводится из массового коэффициента ослабления [20] по формуле

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}, \quad (2)$$

где μ – линейный коэффициент ослабления материала; ρ – плотность материала. Доза, поглощенная чувствительными зернами пленки или пикселями чувствительности матрицы цифрового плоскопанельного детектора, зависит от предварительно вычисляемой интенсивности действующего излучения:

$$E = I \cdot t \cdot \frac{F_N^2}{F^2}, \quad (3)$$

где t – продолжительность экспозиции; F_N – номинальное фокусное расстояние; F – фактическое фокусное расстояние [9].

По оценочной поглощённой дозе на участке носителя изображения определяется яркость для цифровых плоскопанельных детекторов или величина

полученной оптической плотности для аналоговых плёночных детекторов на основе зависимости

$$D = \frac{k}{1 + e^{-\lg(E) \cdot a}} + b, \quad (4)$$

где D – оптическая плотность; k – коэффициент поглощения плёнок; E – уточнённая экспозиция; a – коэффициент контрастности плёнки; b – коэффициент чувствительности плёнки [9].

Благодаря используемой образовательной технологии [21], обучаемым предоставляется реалистичный опыт проверки качества рентгенограмм, осуществляемый путем оценки различимости изображений проволочных или канавочных индикаторов чувствительности, а также контрастности с применением цифровых двойников негатоскопа и денситометра.

Результаты и их обсуждение

Технологии цифровых двойников в настоящее время успешно развиваются

и находят свое применение на всех этапах жизненного цикла изделия от его конструкторско-технологического моделирования до производства и эксплуатации, включая его неразрушающий контроль и техническую диагностику.

Совокупность цифровых средств дистанционного и виртуального обучения позволяют сократить временные и материальные затраты на обучение и подготовку специалистов, значительно снизить радиационную опасность, в т. ч. на ранних этапах практических занятий, упростить организацию учебных и тренировочных лабораторий. Результаты апробации учебных программ с интеграцией занятий в VR-симуляторе радиографической лаборатории показали, что общее время практики обучающихся увеличивается на 30-65% при сокращении загруженности физической лаборатории более чем на 25%. Вышеперечисленное позволяет увеличить число обучаемых специалистов без материальных и временных затрат на оборудование и сертификацию дополнительных лабораторий, а также повысить средний уровень подготовки специалистов и обеспечить отрасли промышленности достаточным количеством подготовленных кадров в условиях наращивания объемов производства.

Выводы

Разработанное и протестированное программно-аппаратное решение в совокупности с результатами научных исследований позволяет судить о возможности

применения и направлениях развития цифровой образовательной системы с VR-средой. Применение предложенного подхода позволит сократить экологические и медико-биологические риски за счет редуцирования требований к безопасности занятий с применением программно-аппаратного решения. Автоматизация процедур формирования тестовых заданий и контроля знаний на основе программных инструментальных средств и применения математических моделей, включая методы искусственного интеллекта, позволит достигнуть сокращения сроков обучения и способствует дальнейшему увеличению числа подготовленных специалистов по различным видам и методам неразрушающего контроля.

При расширении функциональных возможностей и эволюционного развития программно-аппаратного решения (симулятора промышленной радиографии) на основе применения унифицированного модульного подхода, использования программных библиотек и программно-аппаратных интерфейсов виртуальный симулятор упрощает организацию процесса подготовки специалистов и контроля знаний. Практическая полезность разработки цифровой виртуальной среды (VR-среды) раскрывается благодаря переносу и масштабированию полученного программно-аппаратного решения на другие виды и методы неразрушающего контроля согласно ГОСТ Р 56542-2019 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов».

Список литературы

1. Brown K. Innovation in the Learning Management System (LMS): Design Elements for Retail Industry Training // Research Anthology on Business and Technical Education in the Information Era. IGI Global, 2021. P. 375–402. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-5345-9.ch021>.
2. E-learning for a Boring Process at an Aerospace Industry Company / D. Dindana, F. Muhammad, A. Kurniawati, M. T. Kurniawan // 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA). Bangkok, Thailand: IEEE, 2020. P. 256–260. <https://doi.org/10.1109/ICIEA49774.2020.9101929>.
3. E-learning and industry 4.0: A chatbot for training employees / F. Clarizia, M. De Santo, M. Lombardi, D. Santaniello // Proceedings of Fifth International Congress on Information and Communication Technology. 2021. N 1184. P. 445–453. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5859-7_44.
4. Saboonchi H., Blanchette D., Hayes K. Advancements in radiographic evaluation through the migration into NDE 4.0 // Journal of nondestructive evaluation. 2021. Vol. 40, N 17. P. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10921-021-00749-x>.
5. NDE 4.0: Progress, promise, and its role to industry 4.0 / N. Meyendorf, N. Ida, R. Singh, J. Vrana // NDT & E International. 2023. Vol. 140, no. 8. P. 102957. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102957>.
6. Trampus P. Symbiosis of industry 4.0 and non-destructive evaluation. Buletin Stiintific. Kishinev, 2023. P. 43–51.
7. Ковшов Е. Е., Кувшинников В. С., Казаков Д. Ф. Формирование рентгеновского изображения объекта неразрушающего контроля в среде виртуальной реальности // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24, № 8 (278). С. 22. <https://doi.org/10.14489/td.2021.08.pp.014-022>.
8. Advances in applications of Non-Destructive Testing (NDT): A review / M. Gupta, M. A. Khan, R. Butola, R. M. Singari // Advances in Materials and Processing Technologies. 2022. Vol. 8, N 2. P. 2286–2307. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1909332>.
9. Салихова В. К. Современные LMS-платформы дистанционного обучения // E. Global Congress. 2023. N 3. P. 13–18.
10. Radchikova N. P., Odintsova M. A., Sorokova M. G. The attitude of Russian university teachers towards the digital educational environment // RUDN Journal of Psychology and Pedagogics. 2023. Vol. 20, N 2. P. 311–330. <https://doi.org/10.22363/2313-1683-2023-20-2-311-330>.
11. Легкова И. А., Кропотова Н. А. Особенности дистанционного обучения: риски и перспективы // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов: сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 90-летию образования гражданской обороны.

Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. С. 211–215.

12. Гераськина А. С., Кушунина А. И. Изменения цифровых навыков, особенности и эффективность дистанционного образования // Научно-методические основы формирования функциональной грамотности: теория и практика современной школы: сборник лучших докладов Всероссийской с международным участием научно-практической конференции. Коломна: Государственный социально-гуманитарный университет, 2023. С. 176–182.

13. Разработка и реализация интеллектуальных составляющих цифровой образовательной среды / С. В. Крашенинников, Д. А. Курносков, М. А. Нахатович, Ф. А. Новиков // Современные тенденции инженерного образования: сборник трудов конференции. СПб.: Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного, 2023. С. 178–183.

14. Aerial Nondestructive Testing and Evaluation (aNDT&E) / G. Chen, L. Li, H. Zhang, Z. Shi, B. Shang // Materials Evaluation. 2023. Vol. 81, N 1. P. 67–73. <https://doi.org/10.32548/2023.me-04300>.

15. The InVizAR project: Augmented reality visualization for non-destructive testing data from jacket platforms / C. Boletsis, A. Lie, O. Prillard, K. Husby, J. Li // 18th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications Conference (VISIGRAPP). Trondheim, Norwegian: SINTEF Digital, 2023. P. 114.

16. Косарина Е. И., Михайлова Н. А., Демидов А. А. Сравнение отечественных и зарубежных нормативных документов по радиографическому контролю. Преимущества и недостатки // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2021. № 5. С. 39–48.

17. Макаров А. В. Некоторые особенности использования ГОСТ 7512-82 и ГОСТ ISO 17636-1 при контроле трубопроводов // В мире неразрушающего контроля. 2019. Т. 22, № 1. С. 22–24.

18. Сенситометр для построения характеристических кривых радиографических пленок и определения чувствительности к излучению и градиента в соответствии с требованиями ISO 11699-1: 2008 / А. А. Демидов, Е. И. Косарина, Н. В. Коурова, Н. А. Михайлова // Труды ВИАМ. 2020. Т. 6-7, № 89. С. 81–90.

19. XCOM. URL: <https://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html> (дата обращения: 11.09.2023).

20. Ковшов Е. Е., Кувшинников В. С. Симуляция физических свойств материала объекта контроля в VR-тренажере промышленной радиографии // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26, № 2(296). С. 4–12. <https://doi.org/10.14489/td.2023.02.pp.004-012>.

21. Ковшов Е. Е., Кувшинников В. С., Казаков Д. Ф. Применение моделей цифровых двойников при формировании радиографического изображения в среде

виртуальной реальности // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26, № 9. С. 4–15. <https://doi.org/10.14489/td.2023.09.pp.004-015>.

References

1. Brown K. Innovation in the Learning Management System (LMS): Design Elements for Retail Industry Training. *Research Anthology on Business and Technical Education in the Information Era*. IGI Global, 2021, pp. 375–402. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-5345-9.ch021>

2. Dindana D., Muhammad F., Kurniawati A., Kurniawan M. T. E-learning for a Boring Process at an Aerospace Industry Company. 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA). Bangkok, Thailand: IEEE, pp. 256–260. <https://doi.org/10.1109/ICIEA49774.2020.9101929>

3. Clarizia F., De Santo M., Lombardi M., Santaniello D. E-learning and industry 4.0: A chatbot for training employees. *Proceedings of Fifth International Congress on Information and Communication Technology*, 2021, no. 1184, pp. 445–453. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5859-7_44

4. Saboonchi H., Blanchette D., Hayes K. Advancements in radiographic evaluation through the migration into NDE 4.0. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2021, vol. 40, no. 17, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10921-021-00749-x>

5. Meyendorf N., Ida N., Singh R., Vrana J. NDE 4.0: Progress, promise, and its role to industry 4.0. *NDT & E International*, 2023, vol. 140, no. 8, pp. 102957. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102957>

6. Trampus P. Symbiosis of industry 4.0 and non-destructive evaluation. *Buletin Stiintific. Kishinev*, 2023, pp. 43–51.

7. Kovshov E. E., Kuvshinnikov V. S., Kazakov D. F. Formirovanie rentgenovskogo izobrazheniya ob"ekta nerazrushayushchego kontrolya v srede virtual'noj real'nosti [Radiographic image of a non-destructive testing object generation in a virtual reality environment]. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*, 2021, vol. 24, no. 8(278), pp. 14–22. <https://doi.org/10.14489/td.2021.08.pp.014-022>

8. Gupta M., Khan M. A., Butola R., Singari R. M. Advances in applications of Non-Destructive Testing (NDT): A review. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2022, vol. 8, no. 2, pp. 2286–2307. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1909332>

9. Salihova V. K. Sovremennye LMS-platformy distancionnogo obucheniya [Modern LMS distance learning platforms]. *E. Global Congress*, 2023, no. 3, pp. 13–18.

10. Radchikova N. P., Odintsova M. A., Sorokova M. G. The attitude of Russian university teachers towards the digital educational environment. *RUDN Journal of Psychology and Pedagogics*, 2023, vol. 20, no. 2, pp. 311–330. <https://doi.org/10.22363/2313-1683-2023-20-2-311-330>

11. Legkova I. A., Kropotova N. A. [Features of distance learning: risks and prospects]. *Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya inzhenernykh sistem obespecheniya pozharnoj*

bezopasnosti ob"ektov. Sbornik materialov IX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 90-letiyu obrazovaniya grazhdanskoj oborony [Topical issues of improving engineering systems for ensuring fire safety of facilities. A collection of materials of the IX All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the formation of civil defense]. Ivanovo, Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters Publ., 2022, pp. 211–215. (In Russ.)

12. Geraskina A. S., Kushunina A. I. [Changes in digital skills, features and effectiveness of distance education]. *Nauchno-metodicheskie osnovy formirovaniya funkcional'noj gramotnosti: teoriya i praktika sovremennoj shkoly. Sbornik luchshih dokladov vserossijskoj s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskaya konferencii* [Scientific and methodological foundations of the formation of functional literacy: theory and practice of modern schools. A collection of the best reports of the All-Russian scientific and practical conference with international participation]. Kolomna, State University of Social Sciences and Humanities Publ., 2023, pp. 176–182. (In Russ.)

13. Krashenninnikov S. V., Kurnosov D. A., Nakhatovich M. A., Novikov F. A. [Development and implementation of intellectual components of the digital educational environment]. *Sovremennye tendencii inzhenerenogo obrazovaniya. Sbornik trudov konferencii* [Modern trends in engineering education. Proceedings of the conference]. St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny Publ., 2023, pp. 178–183. (In Russ.)

14. Chen G., Li L., Zhang H., Shi Z., Shang B. Aerial Nondestructive Testing and Evaluation (aNDT&E). *Materials Evaluation*. 2023, vol. 81, no. 1, pp. 67–73. <https://doi.org/10.32548/2023.me-04300>

15. Boletsis C., Lie A., Prillard O., Husby K., Li J. The InVizAR project: Augmented reality visualization for non-destructive testing data from jacket platforms. 18th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications Conference (VISIGRAPP). Trondheim, Norwegian, SINTEF Digital, 2023, p. 114.

16. Kosarina E. I., Mikhailova N. A., Demidov A. A. Sravnenie otechestvennyh i zarubezhnyh normativnyh dokumentov po radiograficheskomu kontrolyu. Preimushchestva i nedostatki [Comparison of domestic and foreign standard documents for radiographic control. Advantages and disadvantages]. *Vse materialy. Enciklopedicheskij spravochnik = All Materials. Encyclopedic Reference Book*, 2021, no. 5, pp. 39–48.

17. Makarov A. V. Nekotorye osobennosti ispol'zovaniya GOST 7512-82 i GOST ISO 17636-1 pri kontrole truboprovodov [Some features of use of GOST 7512-82 and GOST ISO 17636-1 at pipeline inspection]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya = In the World of Nondestructive Testing*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 22–24.

18. Demidov A. A., Kosarina E. I., Kourova N. V., Mikhailova N. A. Sensitometr dlya postroeniya harakteristicheskikh krivykh radiograficheskikh plenok i opredeleniya chuvstvitel'nosti k izlucheniyu i gradienta v sootvetstvii s trebovaniyami ISO 11699-1: 2008

[Sensitometer for construction of characteristic curves of radiographic films and determination of sensitivity to radiation and gradient in accordance with the requirements of ISO 11699-1: 2008]. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, 2020, vol. 6-7, no. 89, pp. 81–90.

19. XCOM. Available at: <https://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>. (accessed 11.09.2023)

20. Kovshov E. E., Kuvshinnikov V. S. Simulyaciya fizicheskikh svojstv materiala ob"ekta kontrolya v VR-trenazhere promyshlennoj radiografii [Testing object's material physical properties simulation in the industrial radiography VR environment]. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*, 2023, vol. 26, no. 2(296), pp. 4–12. <https://doi.org/10.14489/td.2023.02.pp.004-012>

21. Kovshov E. E., Kuvshinnikov V. S., Kazakov D. F. Primenenie modelej cifrovyyh dvojnikov pri formirovanii radiograficheskogo izobrazheniya v srede virtual'noj real'nosti [The use of digital twins models while a radiographic image formation in a virtual reality environment]. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*, 2023, vol. 26, no. 9. pp. 4–15. <https://doi.org/10.14489/td.2023.09.pp.004-015>

Информация об авторах / Information about the Authors

Кувшинников Владимир Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-инженерной и образовательной лаборатории цифровых компьютерных систем и автоматизации НИКИМТ, АО «НИКИМТ – Атомстрой», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: KuvshinnikovVS@atomrus.ru, ORCID: 0000-0002-2565-2510

Vladimir S. Kuvshinnikov, Can. of Sci. (Engineering), Senior Researcher of the Scientific Engineering and Educational Laboratory of Digital Computer Systems and Automation NIKIMT, JSC "NIKIMT – Atomstroy", Moscow, Russian Federation, e-mail: KuvshinnikovVS@atomrus.ru, ORCID: 0000-0002-2565-2510

Ковшов Евгений Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, начальник Научно-инженерная и образовательной лаборатории цифровых компьютерных систем и автоматизации НИКИМТ, АО «НИКИМТ – Атомстрой», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: KovshovEE@atomrus.ru, Researcher ID: B-1077-2016, ORCID: 0000-0003-4758-1730

Evgeny E. Kovshov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of Laboratory of the Scientific Engineering and Educational Laboratory of Digital Computer Systems and Automation NIKIMT, JSC "NIKIMT – Atomstroy", Moscow, Russian Federation, e-mail: KovshovEE@atomrus.ru, Researcher ID: B-1077-2016, ORCID: 0000-0003-4758-1730

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-70-83>



УДК 617.58

Система сбора и оценки нагрузочной информации о биоэлектрических сигналах мышечного аппарата стопы человека с ДЦП

С. М. Яцун¹, А. Н. Рукавицын² ✉, Е. Н. Политов²

¹ Курский государственный университет
ул. Радищева, д. 33, г. Курск 305000, Российская Федерация

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

✉ e-mail: alruk75@mail.ru

Резюме

Целью исследования работы является разработка системы биомеханического исследования объемов движения в стопе и голеностопном суставе для диагностики больных ДЦП при оценке качества реабилитационных мероприятий. Исследован процесс создания компьютерной системы диагностики больных с нарушениями двигательных функций нижних конечностей, которая оснащается специальными биоизмерительными устройствами, обеспеченными специализированными алгоритмами обработки полученной информации, обуславливается необходимостью научных исследований, направленных на разработку методов и средств комплексной оценки результатов физической реабилитации с использованием биомедицинских показателей.

Методы. Использованы методы кинематического анализа движений в голеностопном суставе, осуществлены динамический и статический анализы сил опорных реакций стопы нижних конечностей.

Результаты. Разработана система регистрации движений на основе электронного гониометра, реализованного на основе резистивного потенциометра В10К. Определение абсолютных углов поворота звеньев диагностической системы осуществлено при помощи датчика ускорения ММА7361, который содержит установленные на одной пластине кремния три микромашинных конденсатора. В процессе исследований изменение емкостей микромашинных конденсаторов позволяет обеспечивать фиксацию регистрируемой величины на каждом из направлений. Проходящие через низкочастотные фильтры и каскады температурной компенсации сигналы поступают на соответствующие выходы X, Y и Z. Получаемые ангиограммы позволяют оценить походку исследуемого пациента по двум классам – в норме и при наличии патологии.

Заключение. Разработана система формирования и оценки биоэлектрических сигналов, получаемых с применением мышечного аппарата стопы пациентов с ДЦП, собранная на платформе платы управления Arduino UNO и персонального компьютера общего назначения. Разработанная система позволяет проводить регистрацию биоэлектрических сигналов с последующей их обработкой с помощью персонального компьютера и принятием диагностических решений.

Ключевые слова: биоэлектрический сигнал; цифровая обработка сигнала; диагностическая система; микроконтроллер; акселерометр; тензометрия; принципиальная схема; опорная реакция.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках реализации Федеральной программы трансформации вузов «Приоритет – 2030».

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

Для цитирования: Яцун С. М., Рукавицын А. Н., Политов Е. Н. Система сбора и оценки нагрузочной информации о биоэлектрических сигналах мышечного аппарата стопы человека с ДЦП // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 70–83. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-70-83>.

Поступила в редакцию 20.10.2023

Подписана в печать 15.11.2023

Опубликована 22.12.2023

A System for Collecting and Evaluating Load Information about Bioelectric Signals of the Muscular Apparatus of the Foot of a Person with Cerebral Palsy

Svetlana M. Yatsun¹, Alexander N. Rukavitsyn² ✉, Evgeny N. Politov²

¹ Kursk State University
33 Radishcheva Str., Kursk 305000, Russian Federation

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

✉ e-mail: alruk75@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop a system of biomechanical investigation of the volume of movement in the foot and ankle joint for the diagnosis of patients with cerebral palsy in assessing the quality of rehabilitation measures. The process of creating a computer diagnostic system for patients with impaired motor functions of the lower extremities, which is equipped with special bio-measuring devices provided with specialized algorithms for processing the information obtained, is investigated due to the need for scientific research aimed at developing methods and tools for a comprehensive assessment of the results of physical rehabilitation using biomedical indicators.

Methods of kinematic analysis of movements in the ankle joint were used, dynamic and static analyses of the forces of the supporting reactions of the foot of the lower extremities were carried out.

Results. A motion detection system based on an electronic goniometer implemented on the basis of a B10K resistive potentiometer has been developed. The determination of the absolute rotation angles of the links of the diagnostic system was carried out using the MMA7361 acceleration sensor, which contains three micromachine capacitors mounted on one silicon plate. In the course of research, changing the capacitances of micromachine capacitors makes it possible to fix the recorded value in each direction. Signals passing through low-frequency filters and temperature compensation cascades are sent to the corresponding outputs X, Y and Z. The obtained angulograms allow us to evaluate the gait of the studied patient in two classes – normal and in the presence of pathology.

Conclusion. A system for the formation and evaluation of bioelectric signals obtained using the muscular apparatus of the foot of patients with cerebral palsy, assembled on the platform of the Arduino UNO control board and a general-purpose personal computer, has been developed. The developed system makes it possible to register bioelectric signals with their subsequent processing using a personal computer and making diagnostic decisions.

Keywords: bioelectric signal; digital signal processing; diagnostic system; microcontroller; accelerometer; strain gauge; circuit diagram; reference reaction.

Funding: The study was carried out as part of the implementation of the federal program for the Transformation of universities "Priority – 2030".

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

For citation: Yatsun S. M., Rukavitsyn A. N., Politov E. N. A System for Collecting and Evaluating Load Information About Bioelectric Signals of the Muscular Apparatus of the Foot of a Person with Cerebral Palsy. *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(4): 70–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-70-83>.

Received 20.10.2023

Accepted 15.11.2023

Published 22.12.2023

Введение

Несмотря на успехи нейронаук и расширяющиеся технические возможности, проблема комплексной диагностики пациентов с детским церебральным параличом (ДЦП) является одной из важнейших в ортопедии. Деформации стоп являются наиболее частой патологией опорно-двигательного аппарата у таких больных. Патологические установки стоп выявляются уже в период новорожденности и в дальнейшем закрепляются, трансформируясь в тонические и фиксированные контрактуры, которые приводят к закономерному нарушению соотношений в суставах стопы, нарушению архитектоники и деформации костей стопы.

Проблему правильной диагностики больных с двигательными нарушениями, без сомнения, можно отнести к одной из важных медико-социальных проблем здравоохранения [1; 2; 3; 4]. При назначении реабилитационных мероприятий важно определить степень наличия у больного реабилитационного потенциала. Успешность решения этой

проблемы определяется, прежде всего, наличием материально-технической базы, оснащенной специальными биоизмерительными устройствами, обеспеченными развитыми программными алгоритмами [5; 6]. С внедрением в практическую медицину методов цифровой обработки сигналов и компьютерного анализа появляется качественно новый подход, позволяющий расширить диагностические возможности оценки поступающей информации. Все это обуславливает необходимость дальнейших научных исследований, направленных на разработку методов и средств комплексной оценки результатов физической реабилитации с использованием биомедицинских и электрофизиологических показателей.

Поскольку основным критерием восстановления нарушенных функций поврежденных конечностей является движение, функциональная диагностика должна включать в первую очередь биомеханические и антропометрические измерения. Для количественной оценки двигательной функции в суставах обычно применяют гониометрию и

динамометрию, которые позволяют регистрировать только один параметр движения [7].

Материалы и методы

Для проведения биомеханического обследования стопы и голеностопного сустава разрабатывается специальная биоизмерительная система, предназначенная для определения объемов движения в суставах нижних конечностей больных ДЦП при проведении диагностики состояния. Данная система сбора и оценки нагрузочной информации о биоэлектрических сигналах мышечного аппарата стопы человека регистрирует биоэлектрические сигналы, поступающие от опорно-двигательного аппарата нижних конечностей человека для последующей обработки с помощью ЭВМ. Система включает в себя опорные модули, которые крепятся к стопе и голени обследуемого пациента при помощи крепежных ремней. Опорные модули включают в себя узлы «голени» и «стопы», которые крепятся на соответствующих участках человеческого тела. Данные узлы связаны между собой цилиндрическими шарнирами, оснащенными потенциометрами резистивного типа, которые позволяют проводить измерение относительного угла между подвижными звеньями. Дополнительно, на узле «голени» установлены акселерометры, позволяющие получать данные о положении исполнительных модулей и, соответственно, конечностей в пространстве в абсолютных величинах. На

опорных звеньях «стопы», которые непосредственно контактируют со стопой пациента, в точках возможного контакта установлены три тензометрических датчика давления.

Регистрация сигналов в представленной системе (рис. 1) осуществляется при помощи микроконтроллера ATmega 328, собранного на платформе платы управления (сбора данных) Arduino UNO [8; 9]. Данная плата содержит кварцевый генератор 16 МГц, силовой разъем, разъемы USB и ICSP и кнопку перезагрузки. Платформа также имеет 6 аналоговых входов и 14 цифровых входов/выходов. Причем 6 из 14 цифровых входов/выходов применяются как выходы ШИМ. Аналоговые входы (A0...A5) имеют разрешение 10 бит каждый, что позволяет принимать 1024 различных значения. Диапазон измерения выводов относительно «земли» изменяется от 0 до 5В. При этом предел верхнего значения может быть изменен при помощи функции «analogReference» (вывод AREF).

Представленная система дает возможность регистрировать и обработать количественные параметры, которые определяют характер совершаемых локомоций обследуемого пациента [10]. Система позволяет осуществлять анализ сил опорных реакций как в статике, так и динамике, а также проводить кинематический анализ локомоторных движений в голеностопном суставе. Регистрация локомоций осуществляется при помощи электронного гониометра [11].

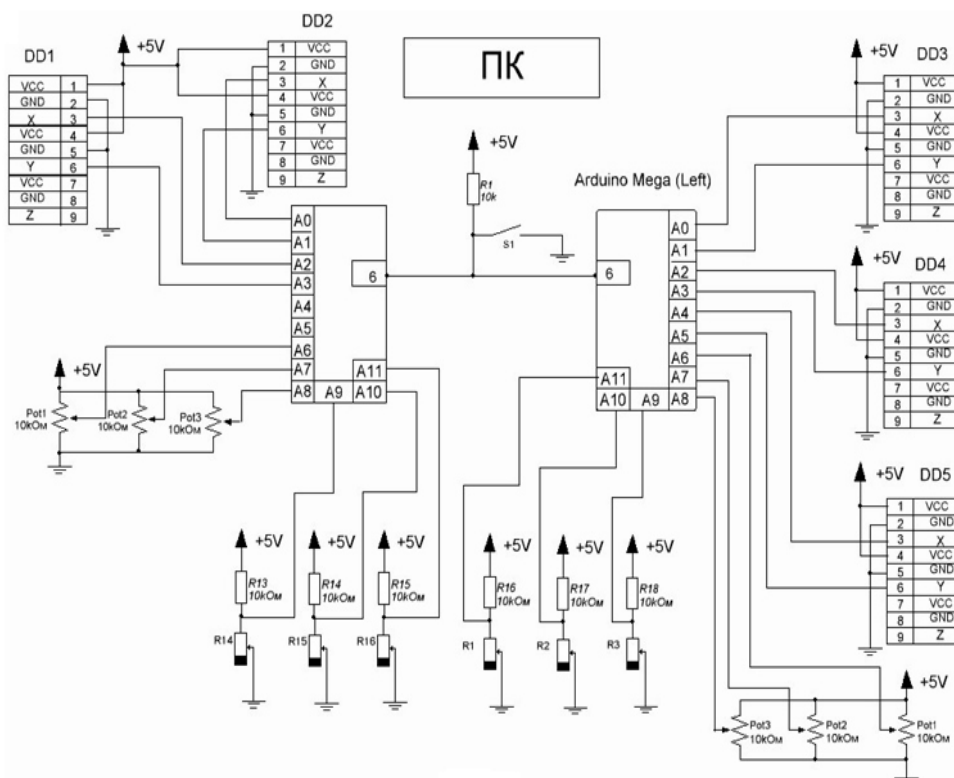


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема системы сбора и оценки нагрузочной информации о биоэлектрических сигналах мышечного аппарата человека

Fig. 1. Schematic diagram of the system for collecting and evaluating load information about bioelectric signals of the human muscular apparatus

Роль данного измерителя выполняет резистивный потенциометр B10K, выходные характеристики которого была получена экспериментальным путем (рис. 2, а). Определение абсолютных углов поворота звеньев «голени» осуществляется при помощи акселерометра (датчика ускорения) ММА7361. Данный датчик имеет три микромашинных конденсатора, установленные на одной пластине кремния, изменение емкости которых позволяет обеспечивать функционирование данного акселерометра. Каждый конденсатор отвечает за одно из направлений – X, Y и Z. Акселерометр ММА7361 позволяет выполнять кинематический анализ сразу в трех

плоскостях. Ускоренное движение приводит к появлению инерционных сил, которые оказывают воздействие на подвижные обкладки конденсаторов. Данное воздействие приводит к изменению величины емкости конденсатора, что приводит к изменению передаваемого напряжения. Поступаемые в каждый из трёх каналов сигналы затем усиливаются, пропускаются через низкочастотные фильтры и каскады компенсации температуры. Обработанные таким образом сигналы поступают на соответствующие выходы X, Y и Z. Нормированные сигналы акселерометра на двух выходах X, Y были получены экспериментально и представлены ниже (рис. 2, б).

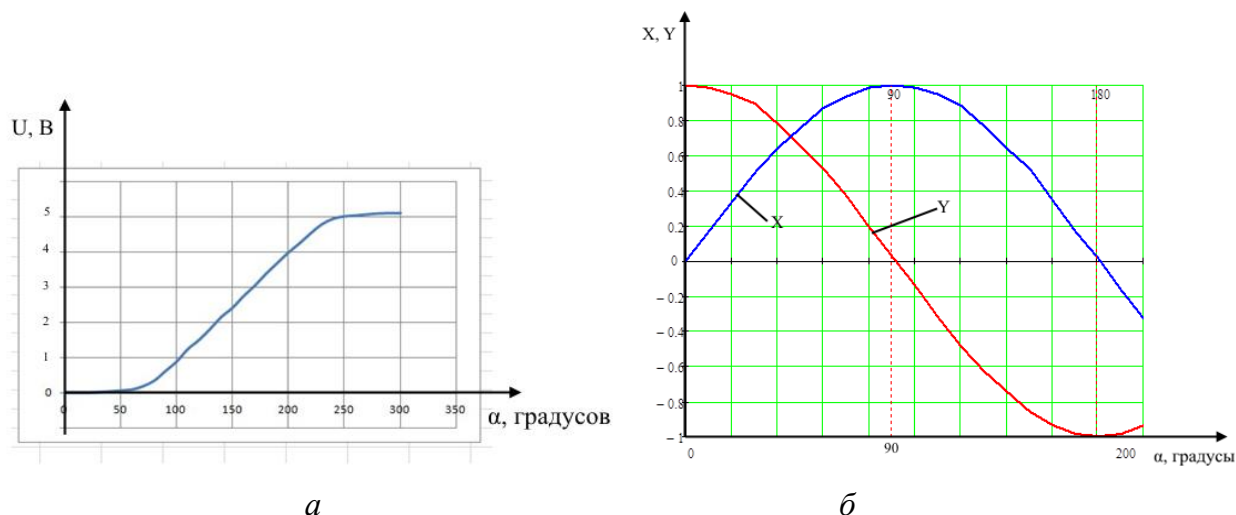


Рис. 2. Выходные характеристики: а – выходная характеристика потенциометра; б – нормированные выходные сигналы акселерометра MMA7361

Fig. 2. Output characteristics: а – output characteristic of the potentiometer; б – normalized output signals accelerometer MMA7361

Определение опорных реакций стопы пациента проводится при помощи специальных измерительных платформ, которые установлены на силовых платформах «стопы» измерительной системы. Измерение сил нормальной реакции [12], возникающей в точках

контакта стопы пациента с опорной поверхностью, при ходьбе или в неподвижном состоянии, осуществляется при помощи трех тензометрических датчиков давления Force Sensitive Resistor 0,5. Рассмотрим схему проведения измерения нормальной реакции (рис. 3).

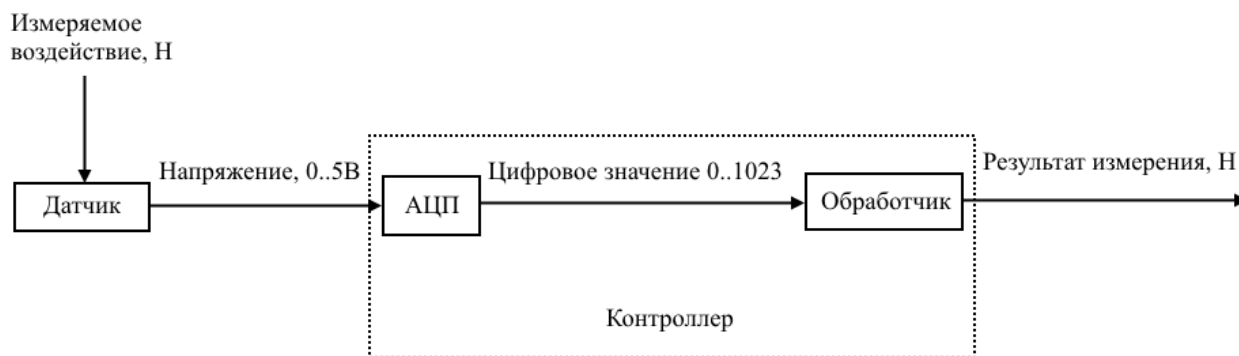


Рис. 3. Схема измерения нормальной реакции стопы

Fig. 3. The scheme of measuring the normal reaction of the foot

Функция обработчика, связывающая величину выходного напряжения, поступающего с датчика давления, с величиной прикладываемого к нему

усилия, также были определены экспериментально. Для этого создавалась нагрузка на датчик грузами различной массы, что дало возможность определить

зависимость выходного сигнала с датчика от массы установленного груза [13]. Полученная экспериментальная зависимость аппроксимировалась функцией

ей $f(x) = (a/(\sigma \cdot x + b)) + c$, а затем определялись коэффициенты аппроксимации (табл. 1).

Таблица 1. Коэффициенты функции аппроксимации

Table 1. Coefficients of the approximation function

Коэффициент	Значение
a	$9,95 \cdot 10^5$
σ	12,8132
b	1000
c	28

Линеаризации выходного сигнала с датчика проводилась при помощи функции

$$u(x) = (a/(\sigma \cdot (y(x) - c)) - b/c,$$

где $u(x)$ – линеаризованный сигнал; $y(x)$ – выходной сигнал с датчика.

Рассмотрим результаты обработки экспериментальных данных (рис. 4).

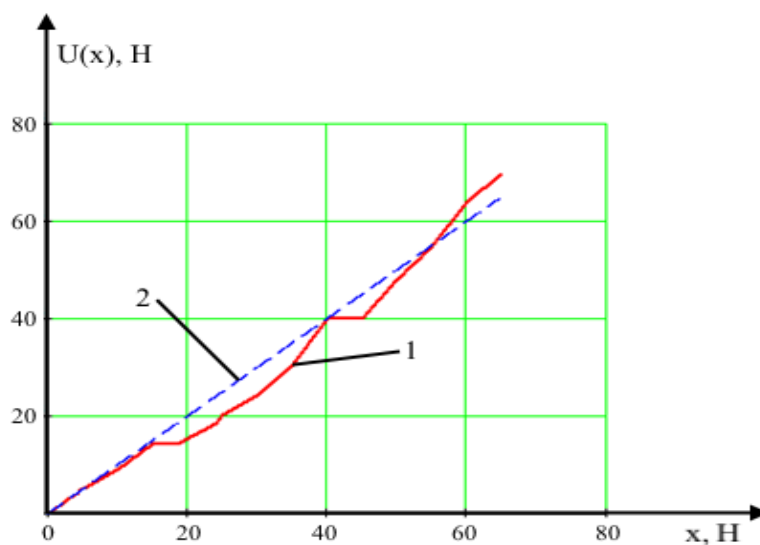


Рис. 4. Зависимость линеаризованного сигнала $u(x)$: 1 – обработка экспериментальных данных; 2 – идеальная линейная функция датчика $y(x) = x$

Fig. 4. Dependence of the linearized signal $u(x)$: 1 – processing of experimental data; 2 – ideal linear function of the sensor $y(x) = x$

Результаты и их обсуждение

Разрабатываемая измерительная система дает возможность получить кинематические зависимости, характеризующие

локомоции в голеностопном суставе в процессе движения, а также позволяет провести анализ опорных реакций стопы при переходе из положения «сидя» к

положению «стоя». Основными задачами проведенных исследований стали ангулография голеностопного сустава и тензометрирование (получение временных зависимостей нормальных реакций в точках опоры) для пациентов с нарушениями функций нижних конечностей. Ангулография, как и гониометрия (метод регистрации относительных движений частей тела), позволяет существенно расширить представления о характере и степени поражения опорно-двигательного аппарата, обеспечить объективный контроль над процессами лечения и реабилитации. Получаемые ангулограммы позволяют оценить походку в норме и при наличии той или

иной патологии. Кроме того, данная информация может быть полезна при оценке эффективности примененного лечения [13; 14].

Тензометрирование и подография, т. е. регистрация электрических сигналов при соприкосновении стопы пациента с опорной поверхностью, также были реализованы с помощью представленной биоизмерительной системы, которая позволяет проводить регистрацию фаз переноса конечности, постановки пятки на опору, переката на всю ступню, отрыва пятки и т. д. Схема расположения датчиков нагрузки при измерении распределения силы давления стопы на опорную поверхность и сама измерительная система представлены (рис. 5).

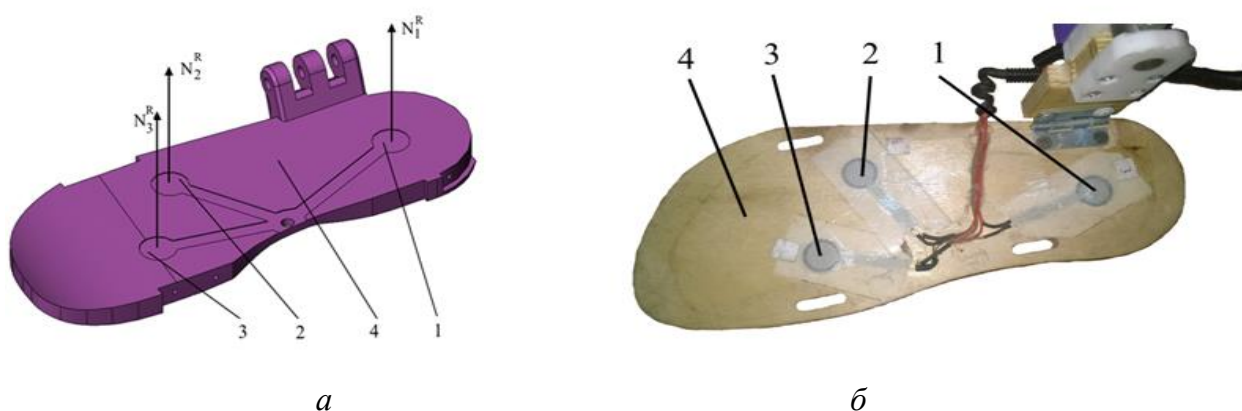


Рис. 5. Схема расположения тензометрических датчиков (а) и физическая реализация биоизмерительной системы (б): 1 – тензодатчик пятки; 2 – тензодатчик средний; 3 – тензодатчик передний; 4 – платформа стопы

Fig. 5. The layout of strain gauges and the physical implementation of the bio-measuring system: 1 – pressure sensor in the heel; 2 – pressure sensor in the middle part of the foot; 3 – pressure sensor in the forefoot; 4 – foot platform

Полученная информация передавалась на персональный компьютер и обрабатывалась по специальному алгоритму [15; 16]. Рассмотрим характер изменения сил давления на рецепторы

биоизмерительной системы при исследовании соприкосновения стопы пациента с опорной поверхностью при переходе из положения «сидя» к положению «стоя» (рис. 6).

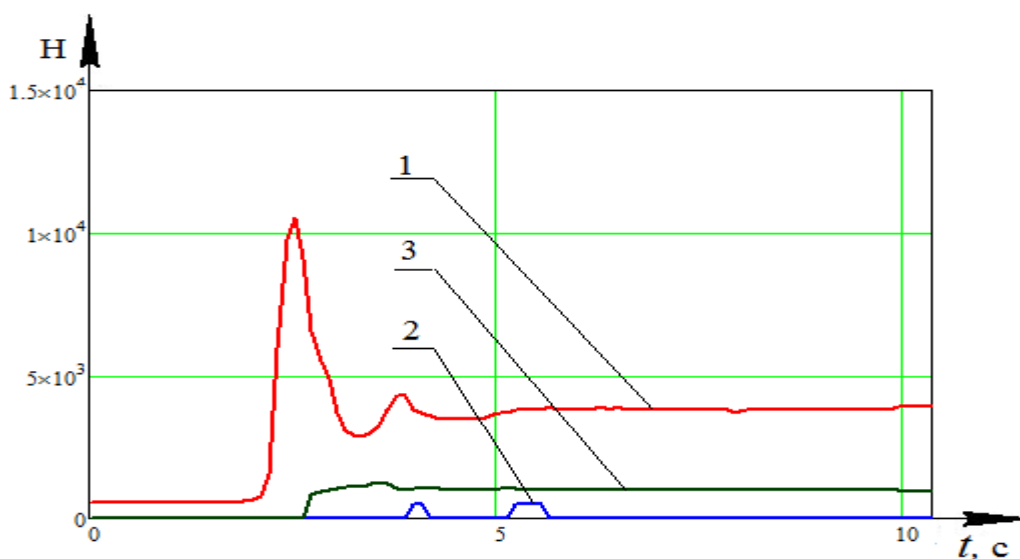


Рис. 6. Тензометрические характеристики стопы, полученные с помощью биоизмерительной системы:
1 – тензодатчик пятки; 2 – тензодатчик средний; 3 – тензодатчик передний

Fig. 6. Tensometric characteristics of the foot obtained using a bio-measuring system:
1 – pressure sensor in the heel; 2 – pressure sensor in the middle part of the foot;
3 – pressure sensor in the front part of the foot

Анализ представленных данных дает возможность утверждать, что опорные реакции неравномерно распределены на некоторой сравнительно небольшой площади контакта между стопой и поверхностью опоры [17; 18]. При выполнении указанного перехода характер распределения изменяется в течение времени опоры: вначале давление оказывается на пятку, затем при постановке всей стопы на опору дополнительно возникает нагрузка в области плюсневых костей [19]. Установлено, что положение максимума давления на стопу меняется при смене темпа и вида совершаемых движений. При этом величина опорных реакций в стопе является своеобразным индикатором, указывающим на одновременное действие всех сил на организм при выполнении локомоций,

что согласуется с опубликованными в [20] исследованиями.

Выводы

Биоэлектрические сигналы широко используются в медицинской практике, и прежде всего для проведения диагностики заболеваний, связанных с нарушением функций опорно-двигательного аппарата человека. В ходе выполнения данного исследования была обоснована структура и разработана система для исследования биоэлектрических сигналов мышечного аппарата стопы пациентов с ДЦП на платформе платы управления Arduino UNO и персонального компьютера общего назначения. Разработанная система позволяет проводить регистрацию биоэлектрических сигналов с последующей их обработкой с помощью персонального компьютера.

Список литературы

1. Медицинские аспекты применения радиолокационных методов обработки сигналов при реализации электрокардиографии сверхвысокого разрешения / К. В. Зайченко, А. А. Кордюкова, Е. П. Логачев, М. Н. Лучкова // Медицинская техника. 2021. Т. 1, № 325. С. 21–24.
2. Эффекты аудиовизуальной стимуляции, автоматически управляемой биопотенциалами мозга и сердца человека / А. И. Федотчев, С. Б. Парин, С. А. Полевая, А. А. Земляная // Физиология человека. 2019. Т. 45, № 5. С. 75–79.
3. Орехова Д. Д., Каримова Е. Д. Ритмическая активность мозга при восприятии медиаконтента и созерцании природы // Актуальные вопросы биологической физики и химии. 2021. Т. 6, № 2. С. 239–244.
4. Изменения биоэлектрической активности мозга при ишемии / Г. В. Придворов, К. Ю. Калитин, А. А. Спасов, О. Ю. Муха // Лекарственный вестник. 2022. Т. 23, № 2 (86). С. 7–16.
5. Баталов А. В., Веселов О. В. Регистрация и обработка сигнала биоэлектрической активности мышц для управления приводом бионического протеза // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 12-2. С. 263–268.
6. Баталов А. В., Веселов О. В. Обработка биоэлектрических сигналов для управления активным экзоскелетом ног // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 5. С. 23–27.
7. Спиркин А. Н., Авдеева Н. В. Выявление патологических состояний по анализу биоэлектрической активности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. Т. 1, № 23. С. 75–84.
8. Журавлёв Д. В., Проводников А. А. Использование шестнадцатиканального комплекса регистрации электроэнцефалограммы для выявления различных изменений электрической активности головного мозга с целью их дальнейшей интерпретации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17, № 5. С. 70–78.
9. Васковская Л. Ф., Гордиевич А. В., Камлач П. В. Многоканальный электрокардиограф с фильтрацией электрокардиограмм методами медиан, Савицкого-Голея и Чебышева // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2021. Т. 19, № 6. С. 45–54.
10. Будко Р. Ю., Чернов Н. Н., Будко Н. А. Метод управления устройствами замещения утраченных функций на основе миосигнала и его верификация в реальном масштабе времени // Вестник молодёжной науки России. 2019. № 6. С. 12.

11. Войтенко В. П., Федорова О. А., Ершов Р. Д. Электронная система регистрации и обработки биоэлектрических сигналов // Технические науки и технологии. 2016. Т. 1, № 3. С. 109–115.
12. Смирнова Л. М., Пономаренко Г. Н., Сусяев В. Г. Методология и информационно-измерительная система для персонифицированного синтеза протезов нижних конечностей // Информационно-управляющие системы. 2021. № 6. С. 64–74. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-64-74>.
13. Арбиева М. В. Задачи реиннервации и обработки ЭМГ-сигнала в разработке биоэлектрического протеза // Молодежный научный вестник. 2018. Т. 4, № 29. С. 71–77.
14. New approaches to rehabilitation of the ankle joint using a mechanotherapeutic apparatus / S. M. Jatsun, A. S. Jatsun, A. N. Rukavitsyn, E. N. Politov // Biomedical Engineering. 2018. Vol. 52, N 1. P. 37–41.
15. Куст С. Ю., Маркова М. В., Писарева А. В. Разработка алгоритма определения местности в системе управления протезом нижней конечности // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2021. Т. 20, № 2. С. 99–105.
16. Аппаратно-программный комплекс для удаленного мониторинга и контроля состояния беременных женщин / И. П. Корнеева, К. А. Крамарь, Е. А. Семенова, А. М. Сергеев, З. М. Юлдашев // Информационно-управляющие системы. 2021. № 6. С. 21–30. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-21-30>.
17. Pimenov V. I., Pimenov I. V. Interpretation of a trained neural network based on genetic algorithms // Information and Control Systems. 2020. N 6. P. 12–20. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-6-12-20>.
18. Evaluation of EEG identification potential using statistical approach and convolutional neural networks / A. E. Sulavko, P. S. Lozhnikov, A. G. Choban, D. G. Stadnikov, A. A. Nigrey, D. P. Inivatov // Information and Control Systems. 2020. N 6. P. 37–49. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-6-37-49>.
19. Зайченко К. В., Гуревич Б. С. Спектральная обработка биоэлектрических сигналов // Медицинская техника. 2021. Т. 1, № 325. С. 12–14.
20. Jatsun S. M., Jatsun A. S., Rukavitsyn A. N. Creation of a biomechatronic orthopedic device for the treatment of flat feet // Biomedical Engineering. 2021. Vol. 54, N 5. P. 361–365.

References

1. Zaichenko K. V., Kordyukova A. A., Logachev E. P., Luchkova M. N. Medicinskie aspekty primeneniya radiolokacionnyh metodov obrabotki signalov pri realizacii elektrokardiografii sverhvyssokogo razresheniya [Medical aspects of the application of radar signal processing methods in the implementation of ultra-high resolution electrocardiography]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2021, vol. 1, no. 325, pp. 21–24

2. Fedotchev A. I., Parin S. B., Polevaya S. A., Zemlyanaya A. A. Effekty audiovizual'noj stimulyacii, avtomaticheski upravlyaemoj biopotencialami mozga i serdca cheloveka [Effects of audio-visual stimulation automatically controlled by biopotentials of the human brain and heart]. *Fiziologiya cheloveka = Human Physiology*, 2019, vol. 45, no. 5, pp. 75–79.
3. Orekhova D. D., Karimova E. D. Ritmicheskaya aktivnost' mozga pri vospriyatii mediakontenta i sozercanii prirody [Rhythmic activity of the brain in the perception of media content and contemplation of nature]. *Aktual'nye voprosy biologicheskoy fiziki i himii = Topical Issues of Biological Physics and Chemistry*, 2021, vol. 6, no. 2, pp. 239–244.
4. Pridvorov G. V., Kalitin K. Yu., Spasov A. A., Mukha O. Yu. Izmeneniya bioelektricheskoy aktivnosti mozga pri ishemii [Changes in bioelectric activity of the brain in ischemia]. *Lekarstvennyy vestnik = Medicinal Bulletin*, 2022, vol. 23, no. 2 (86), pp. 7–16.
5. Batalov A. V., Veselov O. V. Registraciya i obrabotka signala bioelektricheskoy aktivnosti myshe dlya upravleniya privodom bionicheskogo proteza [Registration and signal processing of bioelectric activity of muscles to control the drive of a bionic prosthesis]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern High-Tech Technologies*, 2020, no. 12-2, pp. 263–268.
6. Batalov A. V., Veselov O. V. Obrabotka bioelektricheskikh signalov dlya upravleniya aktivnym ekzoskeletom nog [Processing of bioelectric signals to control the active exoskeleton of the legs]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern High-Tech Technologies*, 2021, no. 5, pp. 23–27.
7. Spirkin A. N., Avdeeva N. V. Vyyavlenie patologicheskikh sostoyanij po analizu bioelektricheskoy aktivnosti [Identification of pathological conditions by analysis of bioelectric activity]. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*, 2018, vol. 1, no. 23, pp. 75–84.
8. Zhuravlev D. V., Provodnikov A. A. Ispol'zovanie shestnadcatikanal'nogo kompleksa registracii elektroencefalogrammy dlya vyyavleniya razlichnykh izmenenij elektricheskoy aktivnosti golovnogogo mozga s cel'yu ih dal'nejshej interpretacii [The use of a sixteen-channel electroencephalogram registration complex to identify various changes in the electrical activity of the brain for the purpose of their further interpretation]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2021, vol. 17, no. 5, pp. 70–78.
9. Vaskovskaya L. F., Gordievich A. V., Kamlach P. V. Mnogokanal'nyy elektrokardiograf s fil'traciej elektrokardiogramm metodami median, Savickogo-Goleya i Chebysheva [Multichannel electrocardiograph with electrocardiogram filtration by median, Savitsky-Goley and Chebyshev methods]. *Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information-Measuring and Control Systems*, 2021, vol. 19, no. 6, pp. 45–54.
11. Voitenko V. P., Fedorova O. A., Ershov R. D. Elektronnaya sistema registracii i obrabotki bioelektricheskikh signalov [Electronic system of registration and processing of

bioelectric signals]. *Tekhnicheskie nauki i tekhnologii = Technical Sciences and Technologies*, 2016, vol. 1, no. 3, pp. 109–115.

12. Smirnova L. M., Ponomarenko G. N., Suslyayev V. G. Metodologiya i informacionno-izmeritel'naya sistema dlya personificirovannogo sinteza protezov nizhnih konechnostej [Methodology and information-measuring system for personalized synthesis of lower limb prostheses]. *Informacionno-upravlyayushchie sistemy = Information-Control Systems*, 2021, no. 6, pp. 64–74. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-64-74>

13. Arbieva M. V. Zadachi reinnervatsii i obrabotki EMG-signala v razrabotke bioelektricheskogo proteza [Tasks of reinnervation and EMG signal processing in the development of bioelectric prosthesis]. *Molodezhnyj nauchnyj vestnik = Youth Scientific Bulletin*, 2018, vol. 4, no. 29, pp. 71–77.

14. Yatsun S. M., Yatsun A. S., Rukavitsyn A. N., Politov E. N. New approaches to rehabilitation of the ankle joint using a mechanotherapeutic apparatus. *Biomedical Engineering*, 2018, vol. 52, no. 1, pp. 37–41.

15. Kust S. Yu., Markova M. V., Pisareva A. V. Razrabotka algoritma opredeleniya mestnosti v sisteme upravleniya protezom nizhnej konechnosti [Development of an algorithm for determining the terrain in the control system of a lower limb prosthesis]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomeditsinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2021, vol. 20, no. 2, pp. 99–105.

16. Korneeva I. P., Kramar K. A., Semenova E. A., Sergeev A. M., Yuldashev Z. M. Aparatno-programmnyj kompleks dlya udalennogo monitoringa i kontrolya sostoyaniya beremennyh zhenshchin [Hardware and software complex for remote monitoring and control of the condition of pregnant women]. *Informacionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*, 2021, no. 6, pp. 21–30. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-21-30>

17. Pimenov V. I., Pimenov I. V. Interpretation of a trained neural network based on genetic algorithms. *Information and Control Systems*, 2020, no. 6, pp. 12–20. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-6-12-20>

18. Sulavko A. E., Lozhnikov P. S., Choban A. G., Stadnikov D. G., Nigrey A. A., Inivatov D. P. Evaluation of the EEG identification potential using a statistical approach and convolutional neural networks. *Information and Control Systems*, 2020, no. 6, pp. 37–49. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-6-37-49>

19. Zaichenko K. V., Gurevich B. S. Spektral'naya obrabotka bioelektricheskikh signalov [Spectral processing of bioelectric signals]. *Meditsinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2021, vol. 1, no. 325, pp. 12–14.

20. Yatsun S. M., Yatsun A. S., Rukavitsyn A. N. The creation of a biomechatronic orthopedic device for the treatment of flat feet. *Biomedical Engineering*, 2021, vol. 54, no. 5, pp. 361–365.

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Светлана Михайловна, доктор медицинских наук, профессор, завкафедрой медико-биологических дисциплин, оздоровительной и адаптивной физической культуры, Курский государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mbd155@mail.ru, Researcher ID: 423663, ORCID: 0000-0002-2020-0814

Svetlana M. Yatsun, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Head of the Department of Biomedical Disciplines, Health and Adaptive Physical Culture, Kursk State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mbd155@mail.ru, Researcher ID: 123546, ORCID: 0000-0002-0477-392

Рукавицын Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alruk75@mail.ru, Researcher ID: 423663, ORCID: 0000-0002-2020-0814

Alexander N. Rukavitsyn, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: alruk75@mail.ru, Researcher ID: 423663, ORCID: 0000-0002-2020-0814

Политов Евгений Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: politovyevgeny@rambler.ru, Researcher ID: 176177, ORCID: 0000-0002-0597-8505

Evgeny N. Politov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: politovyevgeny@rambler.ru, Researcher ID: 176177, ORCID: 0000-0002-0597-8505

Анализ размеров частиц нанопорошков с использованием нейронных сетей и электронной микроскопии

Р. А. Томакова¹ ✉, Д. В. Псарев¹, Ю. А. Неручев², В. А. Старков¹

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

² Курский государственный университет
ул. Радищева, д. 33, г. Курск 305000, Российская Федерация

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Резюме

Цель исследования заключается в разработке приложения, предназначенного для автоматического распознавания формы частиц нанопорошка и установления их размеров на основе нейросетевых технологий, обеспечивающего упрощение процесса подготовки документации при его изготовлении.

Методы. Для определения физических свойств нанопорошков при их изготовлении необходимо проведение анализа распределения частиц по размерам. Предложена методология определения распределения частиц нанопорошка по размерам на основе сверточных нейронных сетей. Для обработки используются изображения, полученные с помощью электронной микроскопии, что позволяет значительно ускорить подготовку произведенных порошков к продаже. Собранный для обучения сверточных нейронных сетей датасет содержит как реальные изображения образцов различных видов нано порошков, так и аугментированные данные, а также сгенерированные изображения. При разработке приложения был использован язык Python, графическая среда программирования LabVIEW, сверточная нейронная сеть YOLO и различные библиотеки языка Python.

Результаты. В результате проведенных исследований была получена обученная на собранном датасете нейросетевая модель, которая выполняет распознавание разнообразных частиц на изображениях и устанавливает количественные оценки этих частиц. Для работы с нейросетевой моделью был создан программный интерфейс, который позволяет проводить анализ образцов нанопорошка.

Заключение. Разработанное приложение позволяет в автоматическом режиме определять средний размер частиц порошка на основе полученных изображений нанопорошков с помощью электронной микроскопии, а также строить графики распределения частиц, составляющих нанопорошок, по размерам. Это значительно упрощает работу производителям нанопорошков и облегчает подготовку необходимой документации для произведенного продукта.

Ключевые слова: нанопорошки; распределение частиц по размерам; PSD; электронная микроскопия; обработка изображений; сверточные нейронные сети.

Финансирование: Исследования выполнены в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Для цитирования: Анализ размеров частиц нанопорошков с использованием нейронных сетей и электронной микроскопии / Р. А. Томакова, Д. В. Псарев, Ю. А. Неручев, В. А. Старков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 84–98. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-84-98>.

Поступила в редакцию 17.10.2023

Подписана в печать 14.11.2023

Опубликована 22.12.2023

Particle Size Analysis of Nanopowders Using Neural Networks and Electron Microscopy

Rimma A. Tomakova¹ ✉, Danila V. Psarev¹, Yury A. Neruchev², Vadim A. Starkov¹

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

² Kursk State University
33 Radishcheva Str., Kursk 305000, Russian Federation

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop an application capable of automatically determining the particle size distribution of nanopowder using neural network technology in order to simplify the process of preparing documentation during its manufacture.

Methods. To determine the physical properties of nanopowders during their fabrication, it is necessary to analyze the particle size distribution. A methodology for determining the size distribution of nanopowder particles based on light neural networks is proposed. Images obtained by electron microscopy are used for processing, which allows to speed up the preparation of manufactured powders for sale. The dataset collected for training contains real images of samples of different powders, augmented data and generated images. The Python language, LabVIEW graphical programming environment, YOLO convolutional neural network and various Python language libraries were used in the development.

Results. The study resulted in a model trained on the collected dataset that is capable of recognizing particles in images. A software interface was created to work with the model to analyze nanopowder samples.

Conclusion. The developed application allows to automatically determine the size of each powder particle on the basis of the obtained images, as well as to build graphs of their size distribution. This greatly simplifies the work of nanopowder producers and facilitates the preparation of the necessary documentation for the produced product.

Keywords: nanopowders; particle size distribution; PSD; electron microscopy; image processing; convolutional neural networks.

Funding: The research was carried out within the framework of the implementation of the development program of the Southwest State University of the strategic academic leadership program "Priority – 2030".

Conflict of interest: The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

For citation: Tomakova R. A., Psarev D. V., Neruchev Y. A., Starkov V. A. Particle Size Analysis of Nanopowders Using Neural Networks and Electron Microscopy. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(4): 84–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-84-98>.

Received 17.10.2023

Accepted 14.11.2023

Published 22.12.2023

Введение

Распределение частиц по размерам (particle-size distribution, PSD) – это важная характеристика нанопорошка, которая оказывает существенное влияние на его свойства и эффективность его применения [1; 2; 3]. Однако, просто зная средний размер частиц, невозможно с

достаточной точностью описать структуру порошка и его свойства [4; 5]. Это проиллюстрировано на рисунке 1, где показаны различные структуры с одинаковым средним размером частиц, но с разным распределением по размерам. Различия в структуре этих образцов явно видны и могут сильно влиять на их свойства.

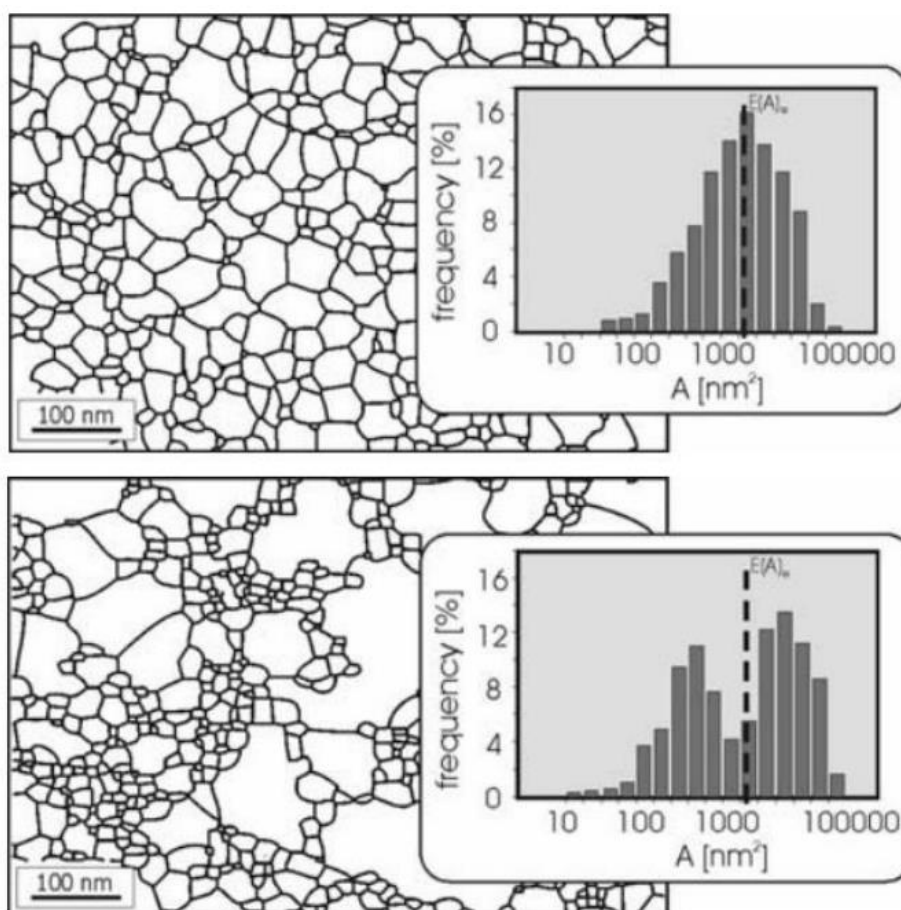


Рис. 1. Структуры образцов, характеризующиеся одинаковой средней величиной размера зерна, но с различным их распределением

Fig. 1. Sample structures characterized by the same average grain size, but with their different distribution

Улучшения в технологиях и методах анализа порошков позволяют более точно контролировать и изучать распределение частиц по размерам. Это дает возможность разработчикам установить связь между структурой порошка и его свойствами, что способствует нахождению оптимальных решений в процессах производства, обработки и характеристики нанопорошков [6; 7; 8; 9].

Более точное изучение и контроль распределения частиц по размерам и химического состава порошка позволяют создавать эффективные материалы с заданными свойствами, применяемые для широкого спектра приложений.

Нанопорошок является смесью зерен различного размера, где мелкая фракция определяет общие свойства порошка. Большой разброс в значениях размеров частиц может нивелировать особенности наносостояния порошка, поэтому на практике обычно требуется получать нанопорошки с узким параметром PSD [6; 7; 10]. Для определения размеров частиц порошка используются различные методы (седиментационные, лазерной дифракции, акустические и др.). Широко применяемым методом получения распределения размеров крупных частиц является фотоанализ – использование фотоснимков измеряемых материалов с последующей программной обработкой.

Для случаев, когда нанопорошок изготавливается для продажи, обязательным этапом производства является получение изображения образца

предлагаемого нанопорошка с помощью электронной микроскопии, которое характеризует визуальные параметры частиц порошка (форму и размеры). Поэтому сопровождаемое изображение можно одновременно использовать и для нахождения PSD произведенного нанопорошка с помощью методов фотоанализа.

Материалы и методы

Цель данной работы – разработка программы, предназначенной для установления распределения по размерам частиц нанопорошка на основе анализа изображений, полученных с помощью электронной микроскопии.

Для достижения поставленных в работе целей были поставлены следующие задачи:

1. Определение размеров каждой из частиц нанопорошка на изображении, полученном с использованием сканирующего электронного микроскопа.
2. Построение графика распределения (графика плотности) найденных частиц по размерам.

Для определения размеров частиц порошка на изображении выбран метод поиска объектов на изображении. Задача заключается в поиске ограничивающих рамок (bounding box) объектов на изображении [11; 12; 13; 14]. Достоинствами данного метода являются автоматическое определение объектов, не полностью находящихся в зоне видимости (например, находятся частично за другими объектами), а также высокая

скорость обработки изображений. К недостаткам метода следует отнести то, что информация о найденном объекте представляет собой ограничивающую рамку, дающую информацию только о размерах полученной частицы. Поэтому ограничением для работы программы будет являться сферичность частиц порошка выше 90%. Найденные на изображении частицы, не удовлетворяющие этому условию, не будут учитываться при подсчете. Также при этом не будут учитываться найденные частицы на краях изображения, так как их размеры могут быть искажены.

Для решения задачи было решено воспользоваться сверточной нейронной сетью (СНС) [15; 16; 17]. В качестве СНС в данной работе используется нейросеть YOLO, которая обеспечивает высокую точность и быстродействие за счет применения сверточной

нейронной сети ко всему изображению за один раз.

Для обучения нейросети был сформирован датасет, состоящий из 400 изображений. 50% датасета составляют реальные изображения нанопорошков, полученные с помощью электронной микроскопии, а оставшиеся 50% были получены с помощью аугментации и генерации данных. Для аугментации выборочных данных был написан программный модуль, позволяющий генерировать изображения, содержащие сферические частицы, расположенные на однородном фоне. На рисунке 2 представлен пример такого сформированного изображения. Далее изображения были размечены (кроме сгенерированных изображений – для них файлы разметки генерируются вместе с изображением). Для разметки датасета использовался инструмент Labellmg (рис. 3).

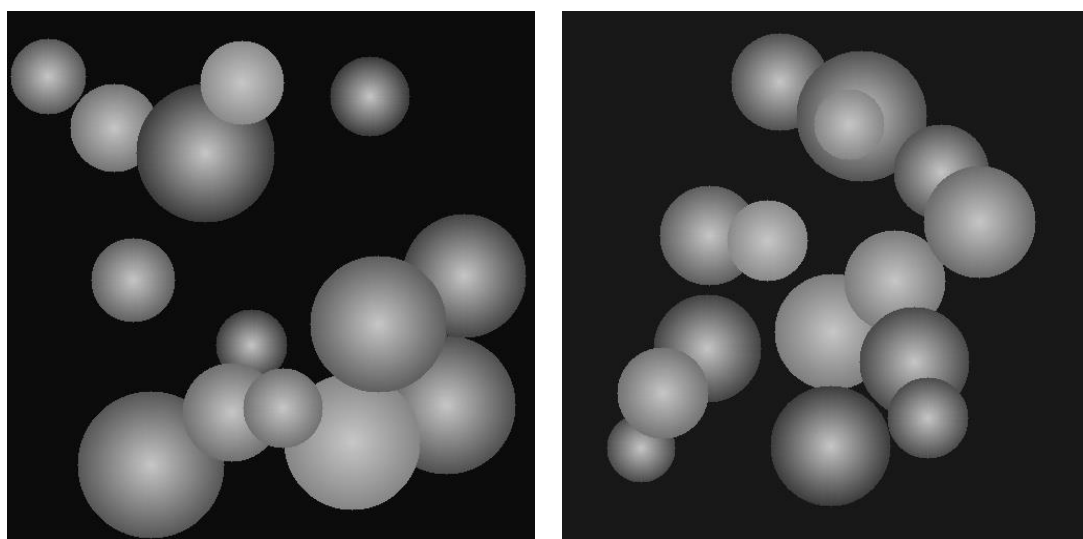


Рис. 2. Изображения, сгенерированные с помощью opencv

Fig. 2. Images generated using opencv

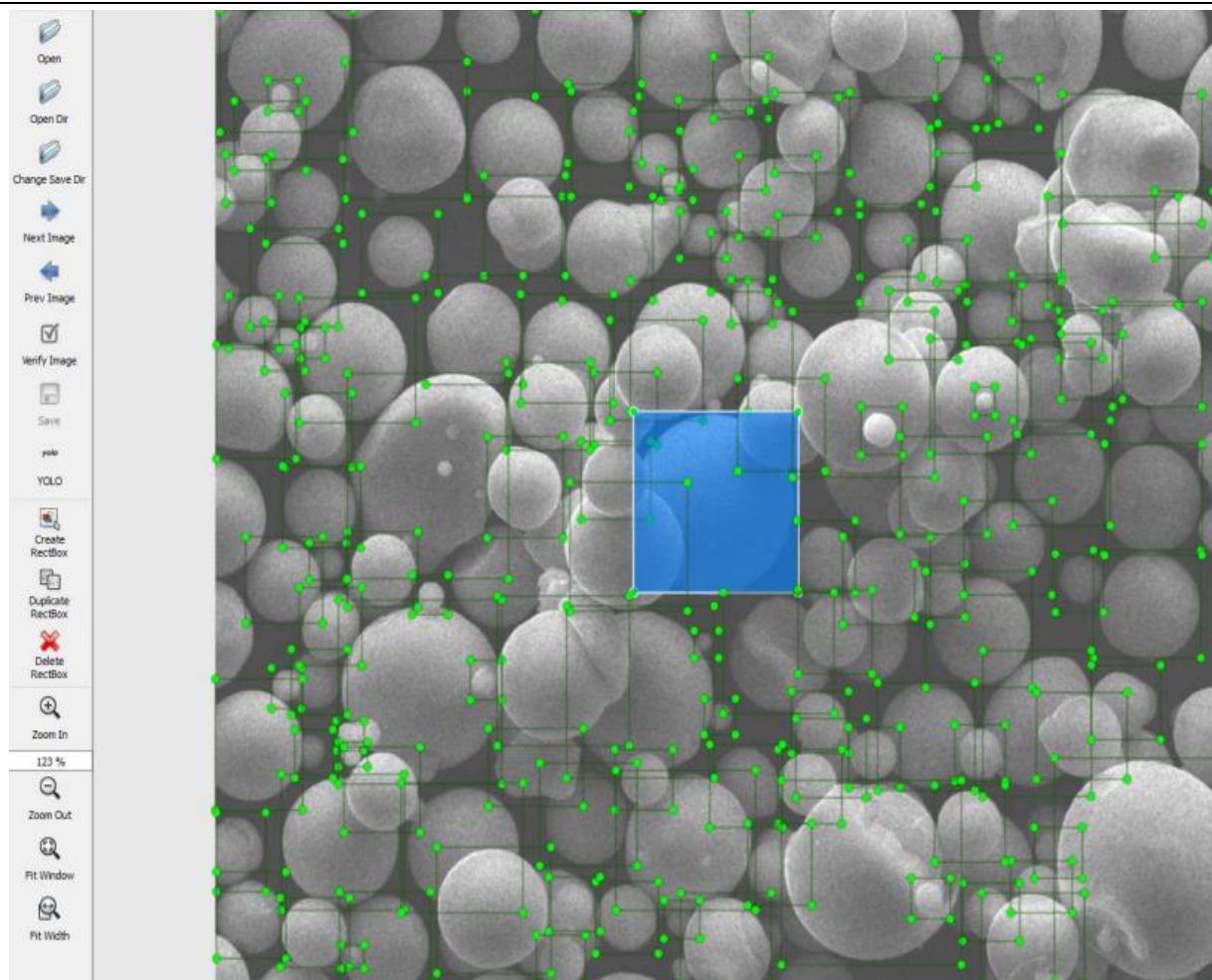


Рис. 3. Проведение разметки частиц нанопорошка [9; 18; 19]

Fig. 3. Marking of nanopowder particles [9; 18; 19]

Сформированный датасет был разделен на обучающую и тестовую выборку в соотношении 4: 1. Модель СНС проходила обучение в течение 8 часов на NVIDIA T4 с использованием системы Google Colaboratory [8; 20]. В дальнейшем была написана программа с использованием данной модели, которая графически выделяет найденные на изображении частицы, а также подсчитывает распределение частиц по размерам.

Результаты и их обсуждение

Для демонстрации работы программы рассмотрим изображение с

известным средним размером частиц 30 мкм, например, сферического порошка сплава TiAl4822 (рис. 4).

Результаты работы поиска объектов на изображении с учетом вышеуказанных условий приведены ниже (рис. 5).

На рисунке 5 отмечены все частицы, определенные с помощью СНС: желтым цветом обозначены частицы, удовлетворяющие поставленным ранее условиям, а красным – не удовлетворяющие.

По полученным результатам можно построить распределение размеров частиц порошка на изображении (график плотности распределения).

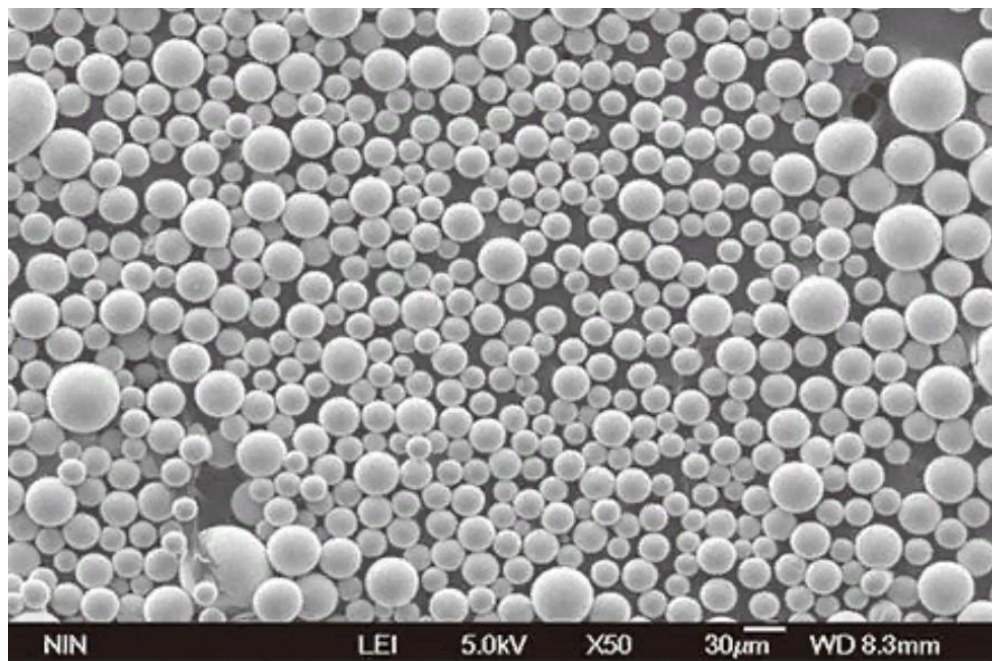


Рис. 4. Изображение сферического порошка сплава TiAl4822 [6; 7]

Fig. 4. Image of spherical alloy powder TiAl4822 [6; 7]

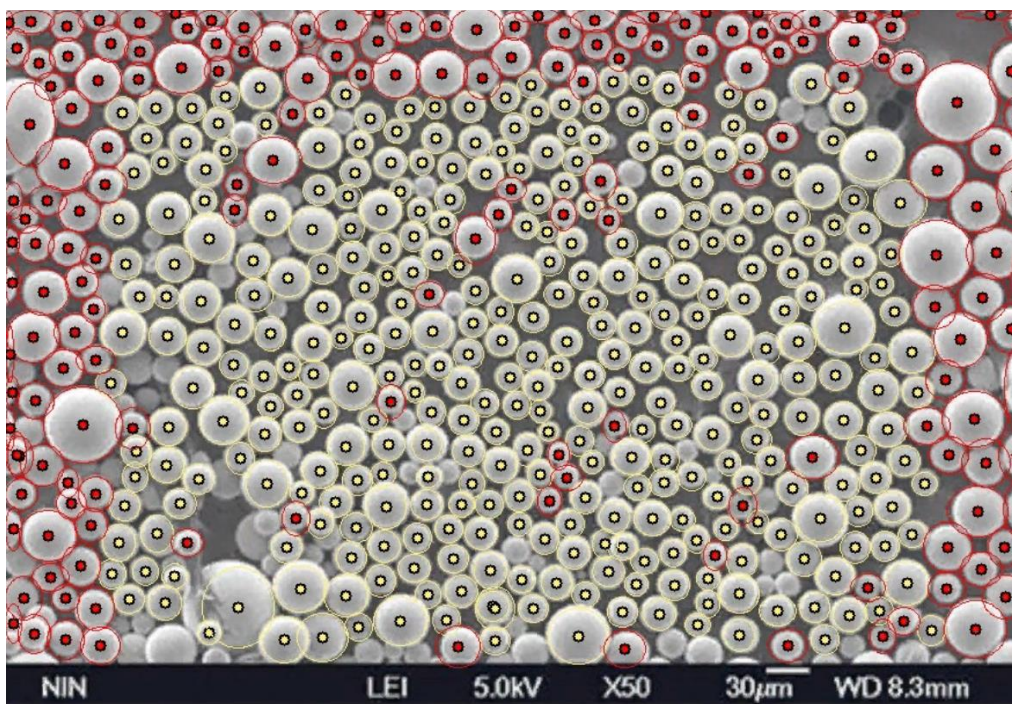


Рис. 5. Обработанное программой изображение порошка

Fig. 5. Powder image processed by the program

Поскольку изображения для разных порошков выполнялись в различном разрешении и с помощью различных

электронных микроскопов, то для определения размеров необходимо дополнительно ввести новый параметр –

количество пикселей в одном микрометре на изображении. С помощью этого параметра можно найти эквивалентные радиусы всех частиц. После получения размеров всех частиц построе-

ние графика распределения частиц по размерам производится с помощью библиотеки *seaborn* в Python [10], которые представлены ниже (рис. 6).

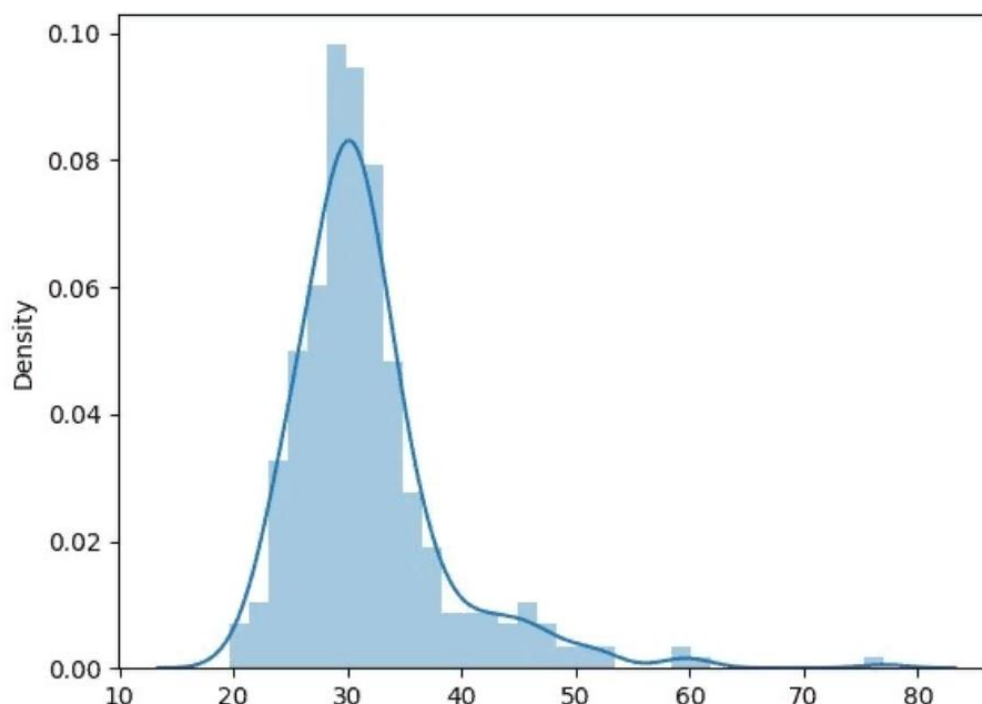


Рис. 6. График распределения частиц по размерам порошка

Fig. 6. Graph of particle size distribution of powder

Анализ полученного распределения свидетельствует о том, что пик графика приходится на 30 мкм, что сопоставляется с данными об образце порошка. Частицы порошка имеют нормальное распределение, не учитывая некоторых крупных частиц. Используя такой график, производитель нанопорошка может определить его основные особенности и определить, какими свойствами он будет обладать.

Итоговое приложение было разработано с использованием системы графического программирования LabVIEW.

Выбор этой системы подтверждается обеспечением и широким использованием LabVIEW в задачах нанотехнологий. Интеграция производится путем использования пакета Python Integration Toolkit.

Схема разработанного приложения отображена на рисунке 7. Кроме указанных ранее параметров были добавлены расстояние от края изображения и коэффициент округлости.

Итоговый скриншот работы приложения приведен ниже (рис. 8).

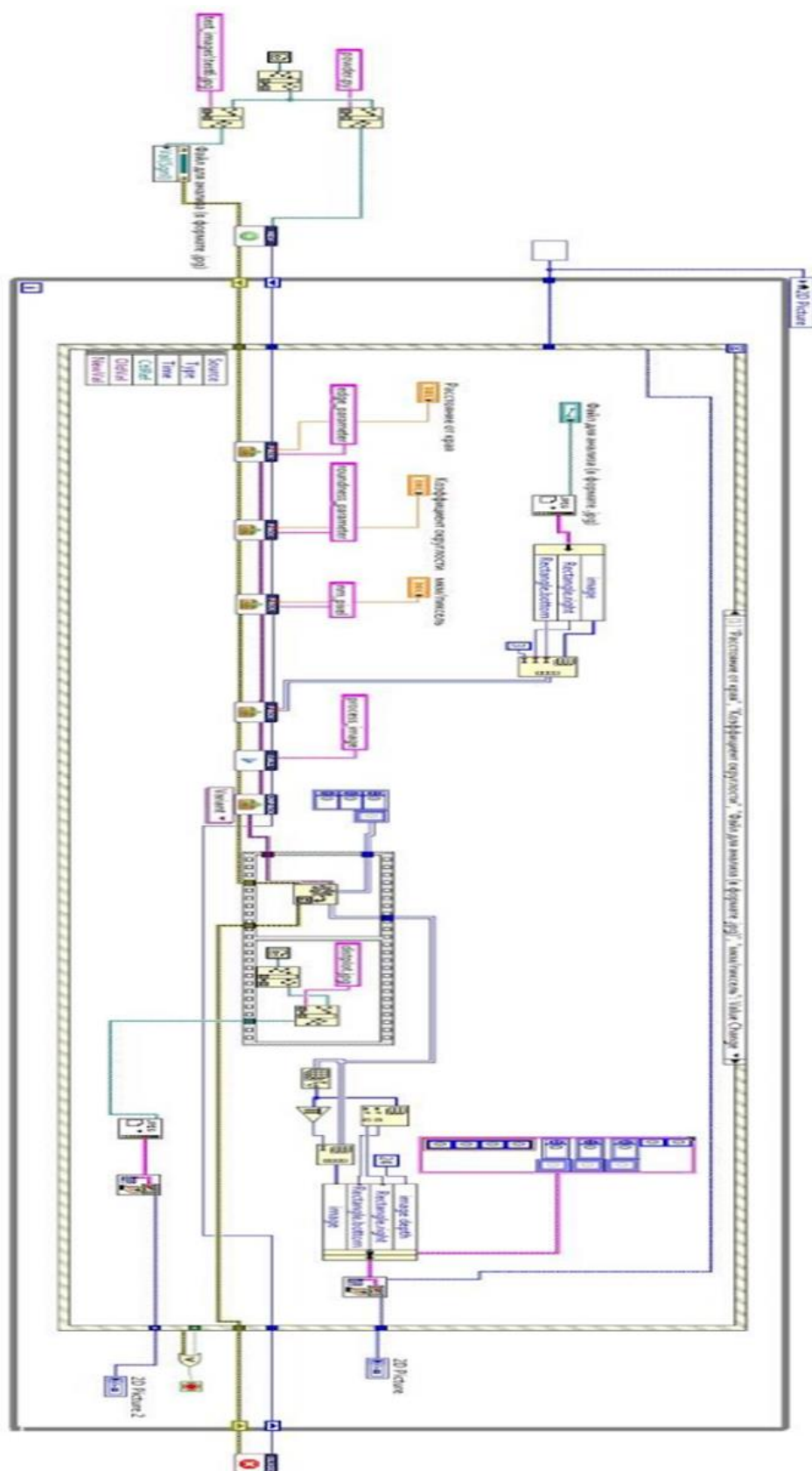


Fig. 7. The final diagram of the application in LabVIEW

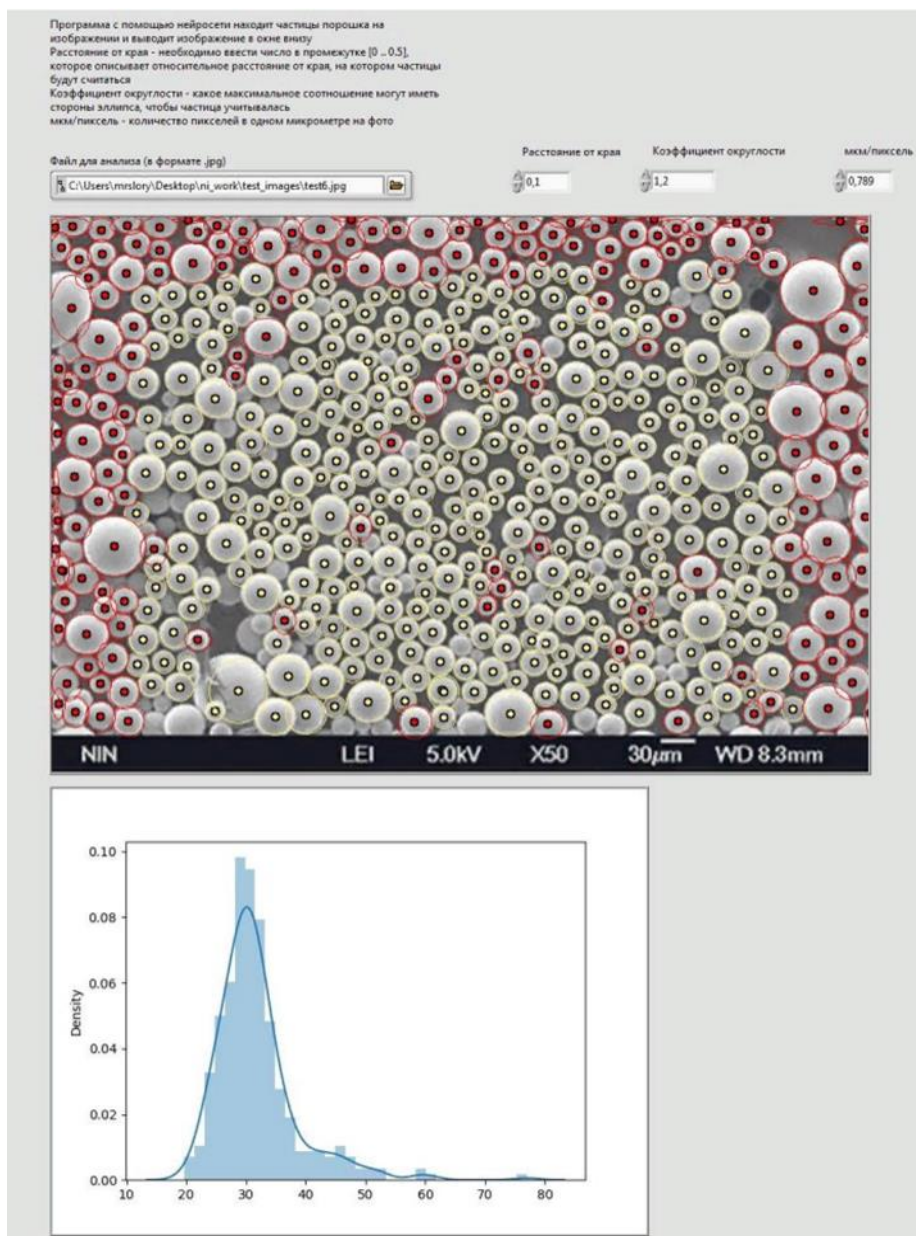


Рис. 8. Скриншоты итоговой работы программы

Fig. 8. Screenshots of the final work of the program

Выводы

На данный момент программа способна работать с нанопорошками, сферичность частиц которых выше 90%. Дальнейшим развитием программы является использование методов определения контуров объектов на изображении с целью получения точных границ каждой частицы.

Данный способ позволит не только определять эквивалентный радиус частиц порошка, но и автоматически определять получаемые формы частиц порошка, что открывает возможность определять бракованные порошки, а также определять свойства материалов, зависящие от характеристик отдельных частиц.

Исследования для обработки изображений, полученных с помощью электронной микроскопии, с использованием нейросетей является малоизученной областью с недостаточным количеством

литературы. Применение новых компьютерных технологий может значительно улучшить процесс анализа частиц нанопорошков и частично автоматизировать его.

Список литературы

1. Application of image analysis for characterization of powders / J. Michalski, T. Wejrzanowski, R. Pielaszek, K. Konopka // *Materials Science – Poland*. 2005. Vol. 23, N 1. P. 79–86.
2. Обзор композиционных металлополимеров, упрочненных нано- и ультрадисперсными частицами / В. Н. Гадалов, О. М. Губанов, И. В. Ворначева, В. Р. Петренко, И. А. Макарова // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2021. Т. 17, № 9 (201). С. 424–432.
3. Физико-химическое и математическое описание диффузионных процессов при сварке порошковых материалов / В. Н. Гадалов, О. М. Губанов, В. Р. Петренко, А. В. Филонович // *Справочник. Инженерный журнал*. 2023. Т. 4, № 313. С. 3–9.
4. Kroetsch D., Wang C. Particle size distribution // *Soil sampling and methods of analysis*. 2008. Vol. 2. P. 713–725.
5. Металлография металлов, порошковых материалов и покрытий, полученных электроискровыми способами / В. Н. Гадалов, В. Г. Сальников, Е. В. Агеев, Д. Н. Романенко // *Управление персоналом и интеллектуальными ресурсами в России*. М.: Инфра, 2011. 468 с.
6. Разработка технологии производства и термическая обработка порошкового титанового сплава Ti6,1Al5,4V1,8Sn / В. Н. Гадалов, О. М. Губанов, Д. С. Алымов, А. В. Филонович, И. В. Ворначева // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2021. Т. 19, № 6. С. 276–280.
7. Производитель порошков Slam Metal Powder – Порошок TiAl4822. URL: <https://www.slammetalpowder.com/ru/товар/tial4822-powder/> (дата обращения: 15.09.2023).
8. Google Colaboratory. URL: <https://colab.research.google.com/> (дата обращения: 01.09.2023).
9. Репозиторий LabelImg. URL: <https://github.com/tzutalin/labelImg> (дата обращения: 02.09.2023).
10. Seaborn: statistical data visualization. URL: <https://seaborn.pydata.org/> (дата обращения: 05.09.2023).

11. Метод классификации рентгенограмм на основе использования глобальной информации об их структуре / Р. А. Томакова, М. В. Томаков, И. В. Дураков, В. В. Жилин // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. № 9. С. 45–51.
12. Томакова Р. А., Филист С. А., Насер А. А. Нечеткие нейросетевые технологии для выделения сегментов с патологическими образованиями и морфологическими структурами на медицинских изображениях // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 43–50.
13. Методы и алгоритмы контурного анализа для задач классификации сложно-структурируемых изображений / М. В. Дюдин, А. Д. Поваляев, Е. С. Подвальный, Р. А. Томакова // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10, № 3-1. С. 54–59.
14. Томакова Р. А., Филист С. А., Томаков М. В. Гибридные технологии в интеллектуальных системах идентификации лекарственных средств // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2014. № 6. С. 31–66.
15. Программное обеспечение интеллектуальной системы классификации форменных элементов крови / Р. А. Томакова, С. А. Филист, В. В. Жилин, С. А. Борисовский // Фундаментальные исследования. 2013. Т. 10, № 2. С. 303–307.
16. Саввин С. В., Сирота А. А. Алгоритм построения многокадрового сверхразрешения изображений в условиях аппликативных помех на основе глубоких нейронных сетей // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46, № 1. С. 130–138.
17. Бережнов Н. И., Сирота А. А. Универсальный алгоритм улучшения изображений с использованием глубоких нейронных сетей // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2022. № 2. С. 81–92.
18. Tomakova R. A., Filist S. A., Pykhtin A. I. Development and Research of Methods and Algorithms for Intelligent Systems for Complex Structured Images Classification // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12, N 22. P. 6039–6041.
19. Клеточные процессоры в классификаторах многоканальных изображений / С. А. Филист, Р. А. Томакова, А. Н. Брежнева, И. А. Малютина, В. А. Алексеев // Радио-промышленность. 2019. № 1. С. 45–52.
20. Сирота А. А., Дрюченко М. А., Пузатых М. С. Моделирование аппликативных помех на изображениях с использованием глубоких нейронных сетей // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2022. № 4. С. 87–98.

References

1. Michalski J., Wejrzanowski T., Pielaszek R., Konopka K. Application of image analysis for characterization of powders. *Materials Science – Poland*, 2005, vol. 23, no. 1, pp. 79–86.
2. Gadalov V. N., Gubanov O. M., Vornacheva I. V., Petrenko V. R., Makarova I. A. Obzor kompozicionnyh metallopolymerov, uprochnennyh nano- i ul'tradispersnymi chasticami [Overview of composite metal polymers reinforced with nano- and ultradisperse particles]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening Technologies and Coatings*, 2021, vol. 17, no. 9 (201), pp. 424–432.
3. Gadalov V. N., Gubanov O. M., Petrenko V. R., Filonovich A. V. Fiziko-himicheskoe i matematicheskoe opisanie diffuzionnyh processov pri svarke poroshkovykh materialov [Physico-chemical and mathematical description of diffusion processes in welding of powder materials]. *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal = Handbook. Engineering Magazine*, 2023, vol. 4, no. 313, pp. 3–9.
4. Kroetsch D., Wang C. Particle size distribution. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2008, vol. 2, pp. 713–725.
5. Gadalov V. N., Sal'nikov V. G., Ageev E. V., Romanenko D. N. Metallografiya metallov, poroshkovykh materialov i pokrytij, poluchennykh elektroiskrovymi sposobami [Metallography of metals, powder materials and coatings obtained by electric spark methods]. *Upravlenie personalom i intellektual'nymi resursami v Rossii [Personnel management and intellectual resources in Russia]*. Moscow, Infra Publ., 2011. 468 p.
6. Gadalov V. N., Gubanov O. M., Alymov D. S., Filonovich A. V., Vornacheva I. V. Razrabotka tekhnologii proizvodstva i termicheskaya obrabotka poroshkovogo titanovogo splava Ti6,1AL5,4V1,8SN [Development of production technology and heat treatment of powder titanium alloy Ti6,1AL5,4V1,8SN]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii = Procurement Production in Mechanical Engineering*, 2021, vol. 19, no. 6, pp. 276–280.
7. Proizvoditel' poroshkov Slam Metal Powder – Poroshok TiAl4822 [Manufacturer of Slam Metal Powder – Powder TiAl4822]. Available at: <https://www.slammetalpowder.com/ru/tovar/tial4822-powder/>. (accessed 15.09.2023)
8. Google Colaboratory. Available at: <https://colab.research.google.com/>. (accessed 01.09.2023)
9. Repozitorij LabelImg [The Labeling repository]. Available at: <https://github.com/tzutalin/labelImg>. (accessed 02.09.2023)
10. Seaborn: statistical data visualization. Available at: <https://seaborn.pydata.org/>. (accessed 05.09.2023)
11. Tomakova R. A., Tomakov M. V., Durakov I. V., Zhilin V. V. Metod klassifikacii rentgenogramm na osnove ispol'zovaniya global'noj informacii ob ih strukture [Method of

classification of radiographs based on the use of global information about their structure]. *Biomedicinskaya radioelektronika* = *Biomedical Radioelectronics*, 2016, no. 9, pp. 45–51.

12. Tomakova R. A., Filist S. A., Naser A. A. Nechetkie nejrosetevye tekhnologii dlya vydeleniya segmentov s patologicheskimi obrazovaniyami i morfologicheskimi strukturami na medicinskih izobrazheniyah [Fuzzy neural network technologies for identifying segments with pathological formations and morphological structures in medical images]. *Biomedicinskaya radioelektronika* = *Biomedical Radioelectronics*, 2012, no. 4, pp. 43–50.

13. Dyudin M. V., Povalyaev A. D., Podval'nyj E. S., Tomakova R. A. Metody i algoritmy konturnogo analiza dlya zadach klassifikacii slozhnostrukturiruemyyh izobrazhenij [Contour analysis methods and algorithms for classification problems of complex structured images]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2014, vol. 10, no. 3-1, pp. 54–59.

14. Tomakova R. A., Filist S. A., Tomakov M. V. Gibridnye tekhnologii v intellektual'nyh sistemah identifikacii lekarstvennyh sredstv [Hybrid technologies in intelligent drug identification systems]. *Nejrokompyutery: razrabotka, primeneniye* = *Neurocomputers: Development, Application*, 2014, no. 6, pp. 31–66.

15. Tomakova R. A., Filist S. A., Zhilin V. V., Borisovskij S. A. Programmnoye obespechenie intellektual'noj sistemy klassifikacii formennyh elementov krovi [Software of the intelligent classification system of shaped blood elements]. *Fundamental'nye issledovaniya* = *Fundamental Research*, 2013, vol. 10, no. 2, pp. 303–307.

16. Savvin S. V., Sirota A. A. Algoritmy postroyeniya mnogokadrovogo sverhrazresheniya izobrazhenij v usloviyah aplikativnyh pomex na osnove glubokih nejronnyh setej [Algorithm for constructing multi-frame super-resolution of images in the conditions of applicative interference based on deep neural networks]. *Kompyuternaya optika* = *Computer Optics*, 2022, vol. 46, no. 1, pp. 130–138.

17. Berezhnov N. I., Sirota A. A. Universal'nyj algoritmy uluchsheniya izobrazhenij s ispol'zovaniem glubokih nejronnyh setej [Universal image enhancement algorithm using deep neural networks]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyj analiz i informacionnye tekhnologii* = *Bulletin of the Voronezh State University. Series: System analysis and Information Technology*, 2022, no. 2, pp. 81–92.

18. Tomakova R. A., Filist S. A., Pykhtin A. I. Development and Research of Methods and Algorithms for Intelligent Systems for Complex Structured Images Classification. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12, no. 22, pp. 6039–6041.

19. Filist S. A., Tomakova R. A., Brezhneva A. N., Malyutina I. A., Alekseev V. A. Kletochnye processory v klassifikatorah mnogokanal'nyh izobrazhenij [Cellular processors in multichannel image classifiers]. *Radiopromyshlennost'* = *Radio Industry*, 2019, no. 1, pp. 45–52.

20. Sirota A. A., Dryuchenko M. A., Puzatyh M. S. Modelirovanie aplikativnyh pomekh na izobrazheniyah s ispol'zovaniem glubokih nejronnyh setej [Modeling of applicative interference in images using deep neural networks]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemyj analiz i informacionnye tekhnologii = Bulletin of the Voronezh State University. Series: System Analysis and Information Technology*, 2022, no. 4, pp. 87–98.

Информация об авторах / Information about the Authors

Томакова Римма Александровна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация
e-mail: rtomakova@mail.ru,
Researcher ID: O-6164-2015,
ORCID: 0000-0003-152-4714

Rimma A. Tomakova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: rtomakova@mail.ru,
Researcher ID: O-6164-2015,
ORCID: 0000-0003-152-4714

Псарев Данила Викторович, магистрант кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: Pppkddd24@mail.ru,
ORCID: 0009-0003-1737-4703

Danila V. Psarev, Undergraduate of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
ORCID: 0009-0003-1737-4703

Неручев Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики и нанотехнологий, научный руководитель научно-исследовательского центра физики конденсированного состояния, Курский государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: yuan2003@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-8087-874X

Yury A. Neruchev, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Physics and Nanotechnology, Scientific Supervisor of the Research Center for Condensed Matter Physics, Kursk State University, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: yuan2003@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-8087-874X

Старков Вадим Артемович, студент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: safmp333@list.ru,
ORCID: 0009-0009-0038-5119

Vadim A. Starkov, Student of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: safmp333@list.ru,
ORCID: 0009-0009-0038-5119

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-99-114>



УДК 04.93'1; 004.932

Методика диагностики глаукомы по снимкам глазного дна человека

С. В. Комкова¹ ✉

¹ Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени А. Г. и Н. Г. Столетовых
ул. Орловская, д. 23, Владимирская область, г. Муром 602264, Российская Федерация

✉ e-mail: savicheva-svetlana2010@yandex.ru

Резюме

Цель исследования – разработка методики обнаружения глаукомы, которая основана на вычислении величины соотношения размеров оптической чашки и оптического диска и правиле четырех квадрантов. Их использование повышает точность обнаружения глаукомы на изображениях сетчатки глаза человека.

Методы. Предложена методика обнаружения глаукомы, которая использует отношение вертикального диаметра чашки к вертикальному диаметру диска и правило «четырёх квадрантов» в качестве двух основных параметров для обнаружения глаукомы. Диск зрительного нерва (ОД), глазная чашка (ОЧ) сегментируются с использованием метода наращивания областей и метода водоразделов, а затем объединяются для получения окончательных результатов. Их объединение выполняется с помощью логической операции ИЛИ. Полученные изображения аппроксимируются с применением круговой аппроксимации, поскольку ее реализация проста за счет вычисления одного центра и радиуса. Для диагностики было решено применять два параметра – соотношение чашки и диска (ОЧД) и правило четырех квадрантов. Их комбинированная оценка позволяет увеличить точность обнаружения глаукомы.

Результаты. Исследование предложенной методики было произведено на снимках сетчатки глаза, полученных из 4 баз данных: HRF, DIARETDB1, DRIONS-DB, Messidor. Исследование показало, что предложенная методика правильно определяет 75 изображений сетчатки как глаукомные из 84с общей чувствительностью 91,67%. Из 163 нормальных изображений 154 были правильно классифицированы как нормальные со специфичностью 94,47%.

Заключение. Предлагаемая методика проста и вычислительно эффективна. Она может быть использована в компьютерной диагностике глаукомы на ранних стадиях заболевания.

Ключевые слова: глаукома; слепота; оптическая чашка; оптический диск; наращивание областей; метод водораздела.

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

Для цитирования: Комкова С. В. Методика диагностики глаукомы по снимкам глазного дна человека // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 99–114. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-99-114>.

Поступила в редакцию 11.10.2023

Подписана в печать 09.11.2023

Опубликована 22.12.2023

Method of Diagnosis of Glaucoma Based on Human Fundus Images

Svetlana V. Komkova¹✉

¹ Murom Institute (Branch) Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletov
23 Orlovskaya Str., Vladimir Region, Murom 602264, Russian Federation

✉ e-mail: savicheva-svetlana2010@yandex.ru

Abstract

The purpose of the research to develop a technique for detecting glaucoma, which is based on calculating the size ratio of the optical cup and optical disc and the "four quadrants" rule. Their use increases the accuracy of glaucoma detection in human retina images.

Methods. A glaucoma detection technique is proposed that uses the ratio of the vertical diameter of the cup to the vertical diameter of the disc and the "four quadrants" rule as the two main parameters for the detection of glaucoma. The optic nerve disc (OD), the ocular cup (OCH) are segmented using the area extension method and the watershed method, and then combined to obtain the final results. Their union is performed using the logical operation OR. The resulting images are approximated using circular approximation, since its implementation is simple by calculating a single center and radius. For diagnostics, it was decided to use two parameters: the ratio of the cup and the disc (OCD) and the rule of "four quadrants". Their combined assessment makes it possible to increase the accuracy of glaucoma detection.

Results: the study of the proposed technique was performed on retinal images obtained from 4 databases: HRF, DIARETDB1, DRIONS-DB, Messidor. The study showed that the proposed technique correctly identifies 75 retinal images as glaucoma out of 84 with a total sensitivity of 91.67%. Of the 163 normal images, 154 were correctly classified as normal with a specificity of 94.47%.

Conclusion. The proposed method is simple and computationally efficient. It can be effectively used in computer diagnostics of glaucoma in the early stages of the disease.

Keywords: glaucoma; blindness; optical cup; optical disc; area extension; watershed method.

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

For citation: Komkova S. V. Method of Diagnosis of Glaucoma Based on Human Fundus Images. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(4): 99–114. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-99-114>.

Received 11.10.2023

Accepted 09.11.2023

Published 22.12.2023

Введение

В настоящее время второй ведущей причиной слепоты в мире является глаукома. Она представляет собой заболевание глаза, вызывающее повреждение зрительного нерва. По мере прогресси-

рования болезни происходит постепенная потеря зрения, которая продолжается в течение длительного периода времени [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9]. Данное заболевание называется «тихим похитителем зрения», так как очень часто

пациент не подозревает о заболевании, пока оно не достигнет запущенной стадии. Глаукома неизлечима, однако при правильном лечении ее развитие можно остановить. Поэтому раннее выявление глаукомы играет незаменимую роль в диагностике глазных заболеваний [10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17].

На рисунке 1 приведено изображение сетчатки, на котором расположены: оптический диск (ОД), оптическая чаша (ОЧ) и нейроретинальный край (НК).

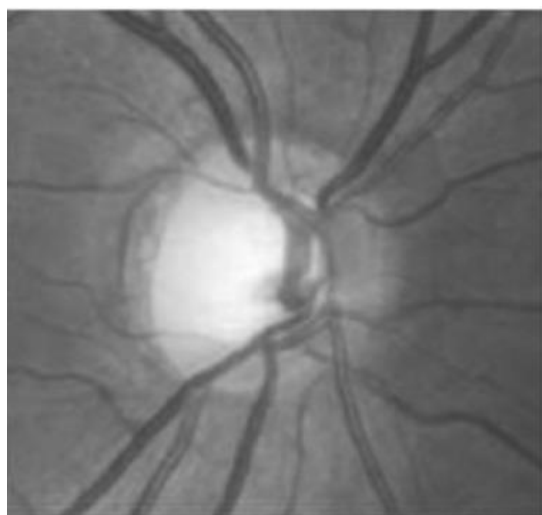


Рис. 1. Изображение сетчатки глаза

Fig. 1. Retina image

ОД служит точкой входа и выхода из глаза. Через него проходят центральная артерия и вена сетчатки. Нормальный ОД имеет оранжево-розовый цвет, но выглядит бледным при наличии патологий. ОЧ представляет собой чашеобразную структуру, расположенную в центре ОД. Это центральная выемка в головке зрительного нерва, лишенная нервных волокон. Нейроретинальный край (НК) лежит между краем ОД и ОЧ. Форма НК изменяется при патологиях

ОД. Внутриглазная жидкость, присутствующая в глазу, оказывает давление на глаз, тем самым изменяя внутриглазное давление (ВГД). В случае глаукомы дренажная система блокируется, и это приводит к повышению ВГД и повреждению волокон зрительного нерва. По мере того как интенсивность повреждения увеличивается, ОД начинает впадать и приобретает чашевидную форму. ОД медленно расширяется по мере прогрессирования заболевания, что приводит к постепенной потере зрения.

Увеличение размеров ОД и истончение НК можно рассматривать как две основные характеристики глаукомного изображения. Увеличение площади чашечки служит индикатором глаукомы и измеряется отношением чашки к диску (ЧД). Значение ЧД невелико для нормального ОД, в то время как оно велико для дисков при глаукоме. Нейроретинальный край можно разделить на четыре квадранта: нижний (1), верхний (2), носовой (3) и височный (4). У здорового глаза нижний (1) ободок обычно толще верхнего (2), который толще, чем носовой (3) ободок, а височный (4) ободок является самым тонким. Таким образом, для оценки глаукомы соотношение чашечек и дисков (ЧД) и правило четырех квадрантов являются двумя наиболее широко используемыми параметрами для диагностики глаукомы. Именно поэтому точная сегментация ОД и ОЧ играет жизненно важную роль в точной оценке заболевания.

Материалы и методы

Предлагаемая методика диагностики исследует входные изображения

сетчатки глаза на наличие глаукомы [18; 19; 20].

Рассмотрим этапы данной методики (рис. 2).



Рис. 2. Общая схема методики

Fig. 2. General scheme of the methodology

• **Этап 1.** Сегментация оптического диска (ОД). Исследование показало, что ОД выглядит ярким и однородным в красном канале, поэтому для каждого изображения извлекается красный канал цветового пространства RGB (рис. 3, б). Помимо этого, изображения сетчатки страдают от неравномерного освещения, что приводит к эффекту затемнения. Данный эффект возникает из-за присутствия низкочастотного шума. Его можно удалить с помощью медианного фильтра (рис. 3, в). Область ОД перекрыта

кровеносными сосудами, что затрудняет его сегментацию и дальнейшую обработку. Для удаления кровеносных сосудов используется операция морфологического открытия в серой шкале. Структурирующий элемент (СЭ) выбирается таким образом, чтобы удалялись только кровеносные сосуды. Объекты, которые слишком малы, чтобы содержать СЭ, удаляются с помощью операции морфологического открытия. При этом количество удаленных кровеносных сосудов зависит от размера СЭ. Если размер СЭ

слишком мал, то будут удалены только тонкие кровеносные сосуды и это приведет к меньшей сегментированной области ОД. Если же размер СЭ окажется слишком велик, то более крупные сосуды будут удалены вместе с некоторой областью вокруг ОД и это приведет к большей сегментированной области ОД в результате процедуры сегментации, чем фактическая область ОД. Экспериментально

было установлено, что для получения хороших результатов сегментации необходимо применение СЭ в форме диска радиусом 34 (рис. 3, з). После удаления кровеносных сосудов ОД сегментируется одновременно с использованием метода наращивания областей и трансформации водораздела (рис. 3, д). Окончательный результат получается путем объединения результатов двух методов.

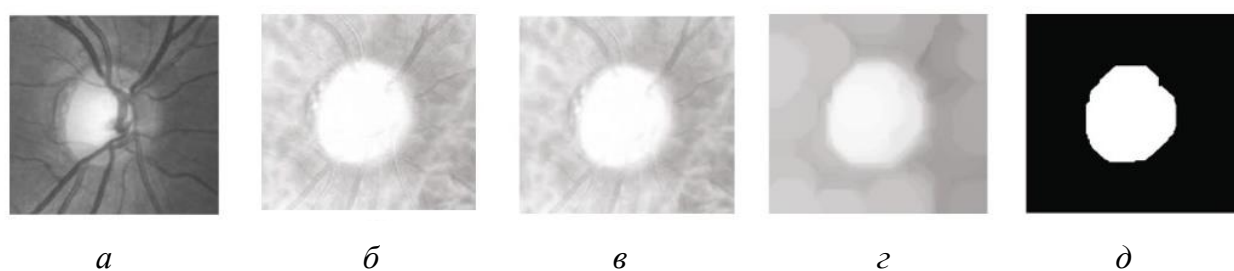


Рис. 3. Сегментация оптического диска: *а* – исходное изображение; *б* – извлечение красного канала цветного пространства RGB; *в* – медианная фильтрация; *з* – удаление кровеносных сосудов; *д* – окончательная сегментация

Fig. 3. Segmentation of the optical disc: *a* – the original image; *б* – extraction of the red channel of the RGB color space; *в* – median filtration; *з* – removal of blood vessels; *д* – final segmentation

1.1. Сегментация ОД с использованием метода наращивания областей. Оптический диск является самой яркой деталью на изображении сетчатки глаза (рис. 3, *а*). Следовательно, можно отметить приблизительную область ОД, если найти на изображении область с максимальной яркостью. Любой пиксель в этой области может быть использован в качестве начальной точки, и эта точка будет использована для запуска процесса наращивания региона. Для добавления соседних пикселей к начальной точке применяется порог. Если интенсивность посевной точки равна S , то к начальной точке добавляется пиксель

при условии, что $|S - N| \leq T$, где N – яркость пикселя, а T указывает порог. Из данного выражения следует, что пиксель добавляется к исходной точке, если абсолютная разница между яркостью исходной точки и яркостью текущих пикселей равна или ниже порогового значения T . Если порог T выбрать минимальный, то меньшее количество пикселей будет добавлено к начальной точке и это приведет к результату сегментации, в котором сегментированная область ОД меньше, чем фактическая область ОД. Если же порог T выбрать максимальным, то это приведет к противоположной ситуации и сегментированная область

окажется больше, чем фактическая область ОД. Исходя из этого были проведены эксперименты, которые показали, что значение порога $T = 25$ дает наилучшие результаты сегментации в большинстве случаев (рис. 3, д).

1.2. Сегментация ОД с использованием преобразования водораздела. Данный метод находит региональные минимумы на изображении и интерпретирует их как объекты, подлежащие сегментации, после чего формирует линии гребней водораздела вокруг этих объектов.

Под региональным минимумом понимается связанная группа пикселей с постоянным значением яркости. Для того чтобы сделать ОД региональным минимумом, необходимо из полученного изображения сделать градиентное. Подобное изображение можно получить, если применить оператор Собеля (рис. 4, а).

Градиентное изображение изменяется с помощью маркеров. Внутренние маркеры соответствуют области ОД, а

внешние маркеры – это границы объектов, соответствующие региональным минимумам и имеющие большие значения яркости. Пороговое значение T в данном случае установим по формуле

$$T = \min(I(x, y)) + I,$$

где $\min(I(x, y))$ дает минимальное значение яркости, чтобы выделить только те региональные минимумы, которые представляют интерес. Все минимумы на изображении, глубина которых меньше или равна пороговому значению T , выделяются белым в результирующем изображении (рис. 4, б). Внешний маркер представляет собой круг постоянного диаметра с центром в центре тяжести изображения. Его размер зависит от размера изображения. Исследования показывают, что ОД составляет около 50% площади обрезанного изображения глазного дна. Таким образом, размер круга должен превышать 50% от размера изображения (рис. 4, в). Итоговый результат приведен на (рис. 4, г).

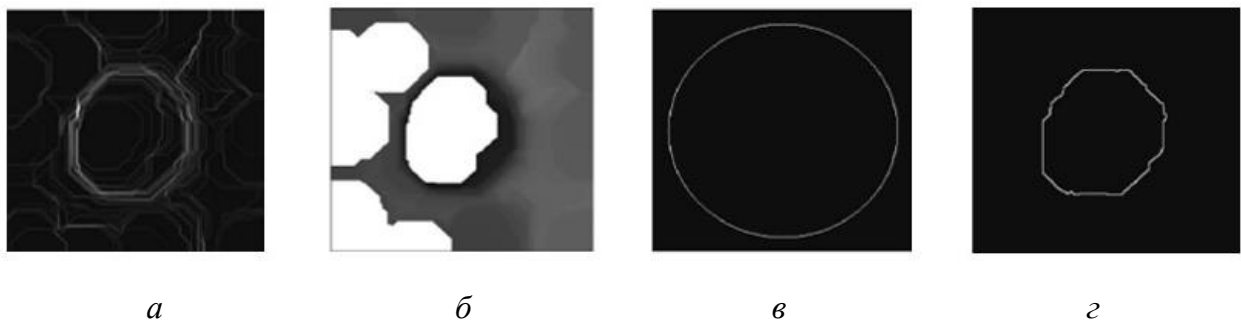


Рис. 4. Сегментация оптического диска: а – применение оператора Собеля; б – выделение пикселей черным и белым цветом; в – прорисовка круга; г – окончательная сегментация

Fig. 4. Segmentation of the optical disk: а – using the Sobel operator; б – highlighting pixels in black and white; в – drawing a circle; г – final segmentation

• **Этап 2.** Сегментация оптической чашки (ОЧ). Сегментация ОЧ значительно сложнее, чем сегментация ОД, из-за высокой плотности кровеносных сосудов, охватывающих границу чашки. Иногда нечеткая граница между ОЧ и ОД затрудняет их различие. Информация о цвете области чашки может использоваться для обнаружения ОЧ. Было установлено, что область чашки выглядит однородной и хорошо контрастирующей на фоне в плоскости «а» цветового пространства Lab.

К исходному изображению в данной плоскости применяется медианная фильтрация с целью удаления компонент с низким уровнем шума. После этого выполняется операция морфологического открытия для удаления

мешающих кровеносных сосудов. Порядок удаления аналогичен удалению, описанному в этапе 1. Экспериментально установлено, что СЭ в форме диска с радиусом 13 дает наилучшие результаты. Обработанное изображение подвергается одновременно двум методам сегментации, аналогичным 1 этапу, а их результаты объединяются.

2.1. Сегментация ОЧ с использованием метода наращивания областей. Порядок сегментации ОЧ аналогичен сегментации ОД. Как и в случае ОД, пороговое значение T , которое будет использоваться для наращивания области, устанавливается экспериментально, и его значение равно 25. Результат сегментации приведен ниже (рис. 5).

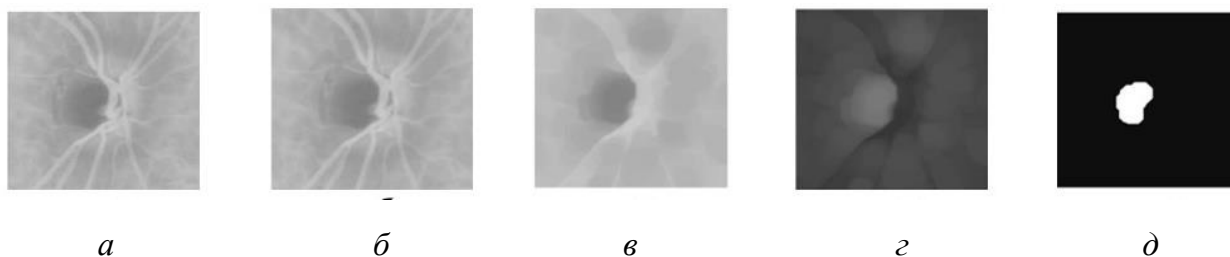


Рис. 5. Этапы проведения сегментации оптической чашки методом наращивания областей: *а* – выделение однородной области ОЧ в цветовом пространстве Lab; *б* – результат применения медианной фильтрации к анализируемому изображению; *в* – результат применения операции морфологического открытия для удаления кровеносных сосудов; *г* – результат применения структурообразующего элемента в форме диска радиуса 13; *д* – результирующее сегментированное изображение

Fig. 5. Steps for Optical Cup Segmentation by Area Expansion: *a* – isolating a uniform region of OC in the Lab color space; *b* – the result of applying median filtering to the analyzed image; *в* – the result of using a morphological opening operation to remove blood vessels; *г* – the result of using a structure-forming element in the form of a disk with a radius of 13; *д* – the resulting segmented image

2.2. Сегментация ОД с использованием преобразования водораздела. Данный метод аналогичен методу, описанному в 1.2. Разница только в размере

диаметра круга. Его размер составляет примерно 25% от размера изображения. Результат показан ниже (рис. 6).

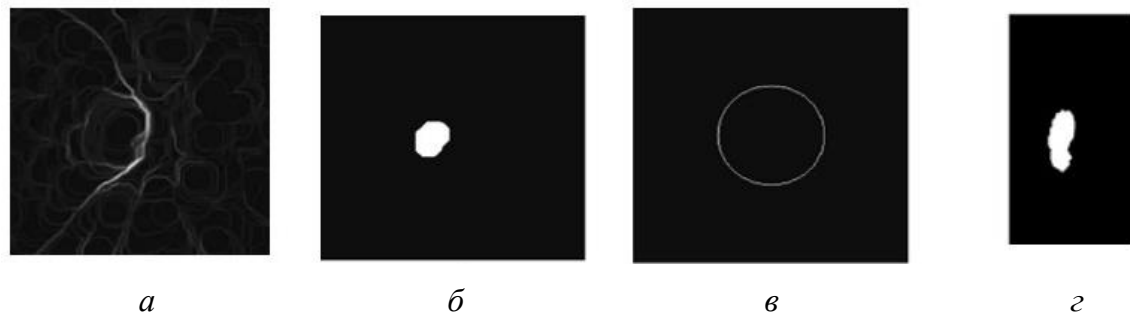


Рис. 6. Этапы проведения сегментации изображения оптической чашки с использованием преобразования водораздела: *а* – исходное изображение; *б* – этап подбора возможного радиуса структурирующего элемента; *в* – промежуточный вариант выбора структурирующего элемента; *г* – обработка изображения структурирующим элементом круг, радиус которого составляет примерно 25% от размера изображения

Fig. 6. Steps for segmenting an optical cup image using a watershed transformation: *a* – initial image; *б* – the step of selecting the possible radius of the structure-forming element; *в* – an intermediate option for selecting a structure-forming element; *г* – image processing by structure-forming element circle, radius of which is approximately 25% of image size

• **Этап 3.** Постобработка. Сегментированные ОД и ОЧ, полученные на этапах 1 и 2 (рис. 7, *а*, *б*), соответственно объединяются для получения

окончательных результатов (рис. 7, *в*). Их объединение выполняется с помощью логической операции ИЛИ.

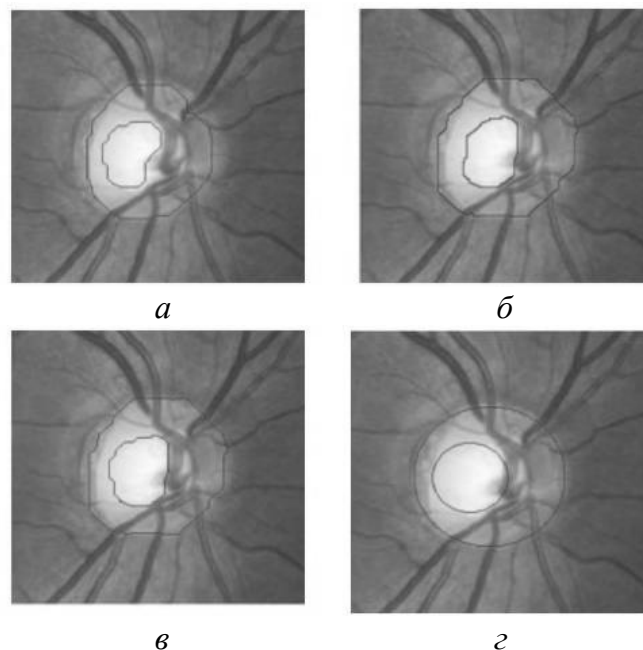


Рис. 7. Результаты окончательной обработки: *а* – сегментированное изображение оптического диска; *б* – сегментированное изображение оптической чашки; *в* – объединение изображений для получения окончательных результатов; *г* – окончательные аппроксимированные результаты

Fig. 7. Final Processing Results: *a* – a segmented image of the optical disc; *б* – segmented image of an optical cup; *в* – combining images to obtain final results; *г* – final approximated results.

Полученные изображения аппроксимируются с применением круговой аппроксимации, поскольку ее реализация проста за счет вычисления одного центра и радиуса. Центр для реализации круга можно легко определить, найдя центр тяжести сегментированного ОД и ОЧ, тогда как радиус можно оценить, вычислив половину ширины ОД и ОЧ в горизонтальном или вертикальном направлении в зависимости от того, что больше. Окончательные аппроксимированные ОД и ОЧ показаны на рисунке 7, *г*.

• **Этап 4.** Выявление глаукомы. Для диагностики было решено применять два параметра – соотношение чашки и диска (ОЧД) и правило четырех

квадрантов. Их комбинированная оценка позволяет увеличить точность обнаружения глаукомы.

4.1. Оценка ОЧД. При глаукоме площадь чашки увеличивается медленно, что приводит к постепенной потере зрения. Увеличение площади чашки исследуют путем оценки значения ОЧД. Клинически ОЧД определяется как отношение вертикального диаметра чашки (ВДЧ) к вертикальному диаметру диска (ВДД) (рис. 8, *а*). Значение ОЧД рассчитывается по формуле

$$\text{ОЧД} = \frac{1 \text{ ВДЧ}}{4 \text{ ВДД}}.$$

Значение ОЧД меньше 0,5 для нормального ОД, тогда как оно превышает 0,5 в случае глаукомного диска.

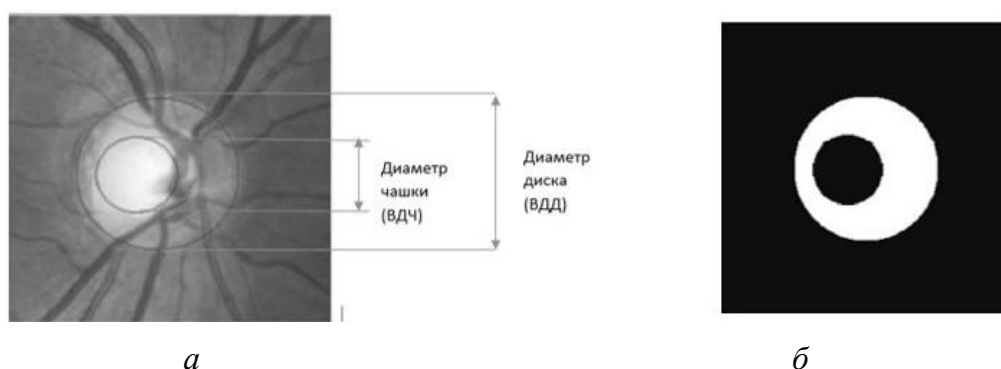


Рис. 8. Оценка ОЧД: *а* – исходное изображение сетчатки; *б* – сегментированное изображение

Fig. 8. Evaluation of the OCD: *a* – original retinal image; *b* – segmented image

4.2. Оценка площади НК в четырех квадрантах. Область НК играет важную роль в анализе глаукомы. Согласно правилу четырех квадрантов, для нормального ОД область НК лежит в следующем порядке: 1) нижняя; 2) верхняя; 3) височная; 4) область носа.

Глаукома вызывает повреждение верхних и нижних нервных волокон до

височных и носовых волокон. Это приводит к истончению верхнего и нижнего краев и, следовательно, нарушению правила четырех квадрантов.

Область НК (рис. 8, *б*) извлекается путем выполнения операций XOR над двоичными сегментированными изображениями ОД и ОЧ.

Результаты и их обсуждение

Исследования предложенной методики проводились по 4 общедоступным базам: HRF, DIARETDB1, DRIONS-DB, Messidor. Изображения, полученные из различных источников, классифицируются на нормальные или глаукомные. В таблице 1 представлены результаты оценки 10 изображений, взятых выборочно из представленных баз. Для каждого изображения были вычислены ОЧД и соответствие правилу четырех квадрантов.

Оценка была проведена путем вычисления значений точности, чувстви-

тельности и специфичности по следующим формулам [20]:

$$\text{Точность} = \frac{(TP+TN)}{(TP+TN+FP+FN)},$$

$$\text{Чувствительность} = \frac{TP}{(TP+FN)},$$

$$\text{Специфичность} = \frac{TN}{(TN+FP)},$$

где TP – количество глаукомных изображений, классифицированных как глаукомные; FN – количество изображений глаукомы, классифицированных как нормальные; TN – это количество нормальных изображений, классифицированных как нормальные; FP – это количество нормальных изображений, классифицированных как глаукомные.

Таблица 1. Результаты расчетов

Table 1. Calculation results

Номер изображения	ОЧД по предлагаемой методике	Соответствие правилу четырех квадрантов	Вывод
1	0,4321	Соответствует	Нормальное
2	0,6231	Не соответствует	Глаукома
3	0,3102	Соответствует	Нормальное
4	0,6981	Не соответствует	Глаукома
5	0,4125	Соответствует	Нормальное
6	0,3124	Соответствует	Нормальное
7	0,3845	Соответствует	Нормальное
8	0,4887	Соответствует	Нормальное
9	0,5123	Не соответствует	Глаукома
10	0,6134	Не соответствует	Глаукома

В таблицах 2 и 3 приведены результаты разработанной методики для изображений, взятых из разных баз. Исследование показало, что предложенная методика правильно определяет 75 изображений сетчатки как глаукомные из 84с

общей чувствительностью 91,67%. Из 163 нормальных изображений 154 были правильно классифицированы как нормальные со специфичностью 94,47%.

Таблица 2. Результаты обнаружения глаукомы**Table 2.** Glaucoma detection results

База изображений	Количество изображений с глаукомой	Количество правильно обнаруженных	Чувствительность, %
HRF	15	13	86,67
DIARETDB1	16	14	87,5
DRIONS-DB	25	24	96
Messidor	28	26	92,85
Всего	84	77	91,67

Таблица 3. Результаты обнаружения нормальных изображений**Table 3.** Results of normal image detection

База изображений	Количество нормальных изображений	Количество правильно обнаруженных	Специфичность, %
HRF	15	14	93,33
DIARETDB1	46	44	95,65
DRIONS-DB	36	33	91,66
Messidor	66	63	95,45
Всего	163	154	94,47

На некоторых изображениях предложенной методикой были допущены ошибки классификации. Это может быть по двум причинам:

1) на оптическом диске были кроме глаукомы другие патологии, которые мешали выполнить правильный анализ;

2) входное изображение сетчатки имеет низкую контрастность – такую, что граница между ОЧ и ОД невозможно различить.

Выводы

Глаукома – это тяжелое заболевание, приводящее к слепоте. Своевременное обнаружение глаукомы может остановить дальнейшее прогрессирование

заболевания. Однако диагностика глаукомы основана на трудоемких ручных наблюдениях. Следовательно, развитие компьютерных методов обнаружения может помочь офтальмологам в своевременной и рентабельной диагностике заболевания. В данной статье предложена методика обнаружения глаукомы. Она использует отношение вертикального диаметра чашки к вертикальному диаметру диска и правило четырех квадрантов в качестве двух основных параметров для обнаружения глаукомы. ОД и ОЧ сегментируются с применением двух разных алгоритмов, а затем объединяются для получения окончательных результатов.

Исследование предложенной методики было произведено на снимках сетчатки глаза, полученным из 4 баз данных: HRF, DIARETDB1, DRIONS-DB, Messidor. Чувствительность методики –

91,67%. Она проста с точки зрения вычислений, а следовательно, может быть использована в качестве полезного инструмента в приложениях для скрининга глаукомы.

Список литературы

1. Abdel-Razik Youssif A., Ghalwash A., Abdel-Rahman Ghoneim A. Optic disc detection from normalized digital fundus images by means of a vessels' direction matched filter // Medical Imaging. 2018. Vol. 27, N 1. P. 11–18.
2. Evaluation of a system for automatic detection of diabetic retinopathy from color fundus photographs in a large population of patients with diabetes / M. D. Abrmoff, M. Niemeijer, M. S. A. Suttorp-Schulten, M. A. Viergever, S. R. Russell, B. V. Ginneken // Diabetes Care. 2008. Vol. 31, N 2. P. 193–198.
3. Комкова С. В. Методика формирования вектора признаков по изображениям сетчатки глаза // Естественные и технические науки. 2021. № 4. С. 250–252.
4. Комкова С. В. Алгоритм идентификации экссудатов на изображениях сетчатки глаза человека // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2022. Т. 19, № 1. С. 47–51. <https://doi.org/10.14489/vkit.2022.01>.
5. Glaucoma detection using retinal fundus images: A review / J. Cheng, J. Liu, Y. Xu, F. Yin, D. W. K. Wong // Computers in biology and medicine. 2019. N 109. P. 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2019.04.010>.
6. Automated diagnosis of glaucoma using retinal fundus images / M. U. Akram, S. Khalid, S. A. Khan, S. M. Anwar // Computers in biology and medicine. 2020. N 124. P. 103949. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2020.103949>.
7. Glaucoma detection using deep learning and optic disc segmentation / Z. Li, Y. He, S. Keel, W. Meng, R. T. Chang, H. Huang, N. Wang // IEEE transactions on medical imaging. 2018. Vol. 37, N 9. <https://doi.org/10.1109/TMI.2018.2829199>.
8. Computer-aided diagnosis of glaucoma: A review / U. R. Acharya, E. Y. K. Ng, J. E. Eugene Koh, D. Wen Long Wong, C. Chee // Medical and Biological Engineering and Computing. 2020. Vol. 58, N 11. P. 2531–2553. <https://doi.org/10.1007/s11517-020-02176-x>.
9. Detecting Structure and Progression of Glaucomatous Visual Field Defects Using Deep Learning. Glaucoma detection using machine learning techniques / R. Asaoka, H. Murata, A. Iwase, M. Araie // Journal of Clinical Medicine. 2019. Vol. 8, N 12. P. 2090. <https://doi.org/10.3390/jcm8122090>.
10. Identifying medical diagnoses and treatable diseases by image-based deep learning / D. S. Kermany, M. Goldbaum, W. Cai, C. C. S. Valentim, H. Liang, S. L. Baxter, J. Liu // Cell. 2018. Vol. 172, N 5. P. 1122–1131. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.02.010>.

11. Glaucoma detection using retinal images and deep learning: A review / H. Fu, J. Cheng, Y. Xu, F. Yin, D. W. K. Wong // *Computer methods and programs in biomedicine*. 2019. N 182. P. 105068. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2019.105068>.
12. Diagnostic accuracy of a deep learning system in detecting glaucoma on photographs of the optic disc / V. T. J. Koh, Y. C. Tham, C. Y. Cheung, W. L. Wong, M. Baskaran, S. M. Saw, T. Y. Wong // *Ophthalmology*. 2019. Vol. 126, N 12. P. 1627–1639. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2019.06.026>.
13. Glaucoma detection using retinal images: A survey / Y. Xu, J. Cheng, J. Liu, F. Yin, D. W. K. Wong // *Artificial intelligence in medicine*. 2020. N 102. P. 101759. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2019.101759>.
14. Кишечник Е. С., Воронцова И. Г. Диагностические методы оценки состояния макулярного отдела сетчатки нижнего гормонального системного регулирования // *Глаукома*. 2013. Т. 1, № 2. С. 117–119.
15. Клиническая офтальмология: национальное руководство / под ред. Е. Н. Иомдина. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2016.
16. Мещеряков О. В. Методы пассивированного оценивания сетчатого кровотока при глаукоме // *Глаукома*. 2015. Т. 2, № 1. С. 97–106.
17. Сегментирование данных в задачах распознавания объектов / С. В. Дегтярев, Е. А. Криушин, Д. В. Никулин, Е. Н. Иванова // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2021. Т. 11, № 2. С. 76–86.
18. 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. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2021-11-4-106-119>.
19. Алгоритм настройки нечеткого логического вывода в медицинских информационных системах, основанных на знаниях / М. С. Голосовский, А. Б. Юдин, В. Р. Медведев, С. Н. Васягин, Е. В. Евтушенко // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение*. 2021. Т. 11, № 4. С. 196–211. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2021-11-4-196-211>.
20. Комкова С. В. Методика обнаружения твердых экссудатов на изображениях глазного дна человека // *Телекоммуникации*. 2022. № 10. С. 24–28.

References

1. Abdel-Razik Youssif A., Ghalwash A., Abdel-Rahman Ghoneim A. Optic disc detection from normalized digital fundus images by means of a vessels' direction matched filter. *Medical Imaging*, 2018, vol. 27, no. 1, pp. 11–18.
2. Abrmoff M. D., Niemeijer M., Suttorp-Schulten M. S. A., Viergever M. A., Russell S. R., Ginneken B. V. Evaluation of a system for automatic detection of diabetic retinopathy from color fundus photographs in a large population of patients with diabetes. *Diabetes Care*, 2008, vol. 31, no. 2, pp. 193–198.
3. Komkova S. V. Metodika formirovaniya vektora priznakov po izobrazheniyam setchatki glaza [Methodology for forming a feature vector based on retinal images]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Natural and Technical Sciences*, 2021, no. 4, pp. 250–252.
4. Komkova S. V. Algoritm identifikatsii ekssudatov na izobrazheniyah setchatki glaza cheloveka [Algorithm for identification of exudates in human retinal images]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy = Bulletin of Computer and Information Technologies*, 2022, vol. 19, no. 1, pp. 47–51. https://doi.org/10.14489/vkit.2022.01_pp.047-051
5. Cheng J., Liu J., Xu Y., Yin F., Wong D. W. K. Glaucoma detection using retinal fundus images: A review. *Computers in Biology and Medicine*, 2019, no. 109, pp. 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2019.04.010>
6. Akram M. U., Khalid S., Khan S. A., Anwar S. M. Automated diagnosis of glaucoma using retinal fundus images. *Computers in Biology and Medicine*, 2020, no. 124, p. 103949. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2020.103949>
7. Li Z., He Y., Keel S., Meng W., Chang R. T., Huang H., Wang N. Glaucoma detection using deep learning and optic disc segmentation. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2018, vol. 37, no. 9, pp. 1993–2004. <https://doi.org/10.1109/TMI.2018.2829199>
8. Acharya U. R., Ng E. Y. K., Eugene Koh J. E., Wen Long Wong D., Chee C. Computer-aided diagnosis of glaucoma: A review. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 2020, vol. 58, no. 11, pp. 2531–2553. <https://doi.org/10.1007/s11517-020-02176-x>
9. Asaoka R., Murata H., Iwase A., Araie M., Detecting Structure and Progression of Glaucomatous Visual Field Defects Using Deep Learning. Glaucoma detection using machine learning techniques. *Journal of Clinical Medicine*, 2019, vol. 8, no. 12, p. 2090. <https://doi.org/10.3390/jcm8122090>
10. Kermany D. S., Goldbaum M., Cai W., Valentim C. C. S., Liang H., Baxter S. L., Liu J. Identifying medical diagnoses and treatable diseases by image-based deep learning. *Cell*, 2018, vol. 172, no. 5, pp. 1122–1131. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.02.010>
11. Fu H., Cheng J., Xu Y., Yin F., Wong D. W. K. Glaucoma detection using retinal images and deep learning: A review. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2019, no. 182, p. 105068. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2019.105068>

12. Koh V. T. J., Tham Y. C., Cheung C. Y., Wong W. L., Baskaran M., Saw S. M., Wong T. Y. Diagnostic accuracy of a deep learning system in detecting glaucoma on photographs of the optic disc. *Ophthalmology*, 2019, vol. 126, no. 12, pp. 1627–1639. <https://doi.org/10.1016/j.opthta.2019.06.026>
13. Xu Y., Cheng J., Liu J., Yin F., Wong D. W. K. Glaucoma detection using retinal images: A survey. *Artificial Intelligence in Medicine*, 2020, no. 102, p. 101759. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2019.101759>
14. Intestines E. S., Vorontsova I. G. Diagnosticheskie metody ocenki sostoyaniya makulyarnogo otdela setchatki nizhnego gormonal'nogo sistemnogo regulirovaniya [Diagnostic methods for assessing the state of the macular retina of the lower hormonal system regulation]. *Glaukoma = Glaucoma*, 2013, vol. 1, no. 2, pp. 117–119.
15. Klinicheskaya oftal'mologiya: nacional'noe rukovodstvo [Clinical ophthalmology: National guidelines]; ed. by E. N. Iomdin. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2016.
16. Meshcheryakov O. V. Metody passificirovannogo ocenivaniya setchatogo krovotoka pri glaukome [Methods of pacified assessment of reticular blood flow in glaucoma]. *Glaucoma = Glaukoma*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 97–106.
17. Degtyarev S. V., Kriushin E. A., Nikulin D. V., Ivanova E. N. Segmentirovanie dannyh v zadachah raspoznavaniya ob"ektov [Data segmentation in object recognition tasks]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, vol. 11, no. 2, pp. 76–86.
18. Konanykhin A. Yu., Konanykhina T. N., Panishchev V. S. Metody uluchsheniya vydelennoj oblasti izobrazheniya pri bystrodejstvuyushchej obrabotke simvol'noj informacii [Methods for improving the selected image area with high-speed processing of symbolic information]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 106–119. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2021-11-4-106-119>
19. Golosovsky M. S., Yudin A. B., Medvedev V. R., Vasyagin S. N., Yevtushenko E. V. Algoritm nastrojki nechetkogo logicheskogo vyvoda v medicinskih informacionnyh sistemah, osnovannyh na znaniyah [Algorithm for configuring fuzzy inference in medical information systems based on knowledge]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 196–211. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2021-11-4-196-211>

20. Komkova S. V. Metodika obnaruzheniya tverdyh ekssudatov na izobrazheniyah glaznogo dna cheloveka [Methodology for detecting hard exudates in human fundus images]. *Telekommunikacii = Telecommunications*, 2022, no. 10, pp. 24–28.

Информация об авторе / Information about the Author

Комкова Светлана Владимировна, кандидат технических наук, доцент, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени А. Г. и Н. Г. Столетовых, Владимирская область, г. Муром, Российская Федерация, e-mail: savicheva-svetlana2010@yandex.ru, Researcher ID: N-6360-2016, ORCID: 0000-0002-4204-0268

Svetlana V. Komkova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Murom Institute (Branch) of the Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletov, Vladimir Region, Murom, Russian Federation, e-mail: savicheva-svetlana2010@yandex.ru, Researcher ID: N-6360-2016, ORCID: 0000-0002-4204-0268

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-115-130>



УДК 004.93'1; 004.932

Метод и алгоритм реализации множества Мандельброта для обработки сложноструктурируемых изображений

Р. А. Томакова¹ ✉, И. М. Ахмадулин¹, Н. Г. Нефедов¹,
Е. И. Пузырев¹, А. А. Малышев¹

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

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Резюме

Цель исследований. В нашей жизни фракталы распространены повсеместно, например, в природе, в ней встречается огромное количество фигур, подобных самим себе и построенных по определенным законам. Фракталы используют в компьютерной графике, экономике, радиотехнике, физике и многих других областях. Применение фракталов в различных областях науки способно открыть множество новых возможностей. Поэтому разработка программного продукта, предназначенного для визуализации множества Мандельброта, является актуальной задачей.

Цель исследований заключается в разработке программного продукта, предназначенного для обработки сложноструктурируемых изображений на основе фрактальных методов и алгоритмов визуализации множества Мандельброта.

Методы. Для реализации программного продукта с целью визуализации множества Мандельброта был использован язык программирования Java. В качестве локального хранилища данных была использована БД SQLite. Также были применены библиотеки: JavaFX – для создания пользовательского интерфейса; SQLite JDBC 3.21.0 – для работы с БД SQLite; imgscalr – с целью масштабирования изображений; Apache Commons IO 2.6 для работы с файловой системой; ControlsFX v8.40.14 – для создания интерфейса пользователя.

Результаты. Разработанный программный продукт на основе фрактальных методов позволяет существенно выделить текстурные особенности изображений, на основании которых производится операция кластеризация выделенных объектов интереса на изображениях с целью экспортирования для дальнейшей их классификации.

Заключение. В ходе выполнения проекта реализован программный продукт для визуализации множества Мандельброта, который может быть использован для моделирования объектов, имеющих фрактальную форму, применительно к обработке сложноструктурируемых изображений, содержащих невидимые скрытые особенности объектов на изображениях.

Ключевые слова: фрактал; множество Мандельброта; последовательность; оверсемплинг.

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

Для цитирования: Метод и алгоритм реализации множества Мандельброта для обработки сложноструктурируемых изображений / Р. А. Томакова, И. М. Ахмадулин, Н. Г. Неведов, Е. И. Пузырев, А. А. Малышев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 115–130. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-115-130>.

Поступила в редакцию 09.10.2023

Подписана в печать 05.11.2023

Опубликована 22.12.2023

A Method and Algorithm for Implementing the Mandelbrot Set for Processing Complex Structured Images

Rimma A. Tomakova¹ ✉, Ildar M. Akhmadulin¹, Nikita G. Nefedov¹,
Evgeny I. Puzyrev¹, Anton A. Malyshev¹

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

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Abstract

The purpose of research. In our life, fractals are ubiquitous, for example, in nature, there are a huge number of figures similar to themselves and built according to certain laws. Fractals are used in computer graphics, economics, radio engineering, physics and many other fields. The use of fractals in various fields of science can open up many new possibilities. Therefore, the development of a software product designed to visualize the Mandelbrot set is an urgent task.

The purpose of the research is to develop a software product designed for processing complex structured images based on fractal methods and algorithms for visualizing the Mandelbrot set.

Methods. The Java programming language was used to implement the software product in order to visualize the Mandelbrot set. The SQLite database was used as a local data store. Libraries were also used: JavaFX – to create a user interface; SQLite JDBC 3.21.0 – to work with the SQLite database; imgscalr – to scale images; Apache Commons IO 2.6 to work with the file system; ControlsFX v8.40.14 – to create a user interface.

Results. The developed software product based on fractal methods makes it possible to significantly highlight the textural features of images, on the basis of which the clustering operation of selected objects of interest in images is performed in order to export them for further classification.

Conclusion. During the implementation of the project, a software product for visualization of the Mandelbrot set was implemented, which can be used to model objects having a fractal shape, in relation to the processing of complexly structured images containing invisible hidden features of objects in the images.

Keywords: fractal; Mandelbrot set; sequence; oversampling.

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., Ahmadulin I. M., Nefedov N. G., Puzyrev E. I., Malyshev A. A. A Method and Algorithm for Implementing the Mandelbrot Set for Processing Complex Structured Images. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(4): 115–130. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-115-130>.

Received 09.10.2023

Accepted 05.11.2023

Published 22.12.2023

Введение

Появление и развитие компьютерной техники за последние десятилетия кардинально изменило практически все сферы человеческой жизни. Компьютерные системы повсеместно используются в производстве, образовании, медицине, искусстве и т. д.

Появились также виды деятельности, которые не могли бы существовать без возможностей использования вычислительной техники. Одним из них является создание фрактальных изображений (фракталов), предназначенных для использования в различных областях знаний [1; 2; 3; 4]. В настоящее время широко внедряются фрактальные методы применительно для идентификации и распознавания объектов на изображениях по яркостным характеристикам в тех случаях, когда классические методы не дают значимых результатов. В работах [5; 6; 7] показано использование фракталов для решения задач обработки текстурных изображений с целью выделения границ анализируемых объектов на сложноструктурируемых изображениях, полученных при аэрокосмической съемке, медицинской рентгенографии, а также при анализе порошков и пористых материалов. В основу обработки изображений с использованием фрактальных методов положен принцип подобия цветных текстур, основанный на статистических характеристиках анализируемых пространственных объектов с учетом информативных признаков яркости и цвета. Следует заметить, что оценка фрактальных текстур при сегментации изображений [8; 9; 10] осуществляется с учетом их размеров и

масштаба по изменениям анализируемых характеристик в исследуемом итерационном процессе.

Одним из наиболее известных видов фракталов является множество Мандельброта [10; 11; 12]. Фрактальное изображение, полученное на его основе, по сути является раскрашенным участком комплексной плоскости. Создание такого изображения в приемлемом качестве требует большого количества вычислений.

Множество Мандельброта [12; 13] определяется с помощью рекуррентной формулы:

$$Z_{n+1} = Z_n^k + C, \quad (1)$$

где Z и C – комплексные числа, причём Z_0 равно 0; C – координаты точки, для которой производится расчёт, в виде комплексного числа; k – показатель степени, традиционно равен 2.

При вычислении последовательности для выбранной точки на плоскости (C) по этой формуле такая последовательность может иметь разное поведение. Она может быть ограниченной внутри какой-либо области (т. е. модули членов такой последовательности не превышают некоего предельного значения), а может стремиться в бесконечность, в зависимости от значения C . Точки, для которых эта последовательность ограничена, считаются принадлежащими множеству Мандельброта [14; 15].

Авторы статьи разработали программный продукт, предназначенный для визуализации множества Мандельброта Fractalomania применительно к обработке сложноструктурируемых изображений.

Материалы и методы

В разработанном программном продукте реализованы следующие функции редактирования фрактала:

- выбор одной из трёх вариаций множества Мандельброта;
- задание требуемой области координатной плоскости;
- задание требуемой «глубины прорисовки» множества;
- редактор палитры для раскрашивания заданной области множества;
- выбор из двух методов применения созданной палитры к выбранной области, а также диапазон значений, к которому палитра будет применяться;
- выбор одного из нескольких уровней оверсемплинга – методики улучшения качества итогового изображения;
- включение или выключение плавности перехода цвета («Плавный градиент»).

Другие реализованные функции программы:

- сохранение созданных фракталов в локальной БД (SQLite);
- экспорт полученных фракталов в файл формата PNG.

Для реализации данного программного продукта был выбран язык программирования Java как одна из технологий, предоставляющих удобные возможности для создания графического пользовательского интерфейса [16; 17], а также создания кросс-платформенных приложений. Для хранения данных используется локальная БД SQLite.

Также в программе использованы следующие библиотеки [18; 19; 20] и компоненты:

- JavaFX и ControlsFX v8.40.14 для создания интерфейса пользователя;
- SQLite JDBC 3.21.0 для работы с БД SQLite (<https://github.com/xerial/sqlite-jdbc>);
- imgscalr для масштабирования изображений (<https://github.com/rkalla/imgscalr>);
- Apache Commons IO 2.6 для работы с файловой системой (<http://commons.apache.org/proper/commons-io/>).

Для формирования фрактального изображения пользователю необходимо задать нужную область координатной плоскости, а также задать для этой области палитру цветов и способ её применения.

В главном окне программы Fractalomania, которое изображено на рисунке 1, пользователь имеет возможность создать один из трёх типов множества Мандельброта. Они отличаются показателем степени k в формуле $Z_{n+1} = Z_n^k + C$.

На рисунке 2 показано окно редактирования фрактала. Пользователь может выбрать нужную область на координатной плоскости с помощью мыши. Путём перетаскивания и с помощью колёсика мыши изменяется позиция на комплексной плоскости и масштаб, т. е. размер окрестности вокруг выбранной позиции. Задать цветовую палитру можно с помощью редактора палитры. Редактор палитры позволяет создавать, изменять и удалять цвета, а также менять их положение в палитре. Также необходимо задать параметры применения палитры и другие параметры фрактала.

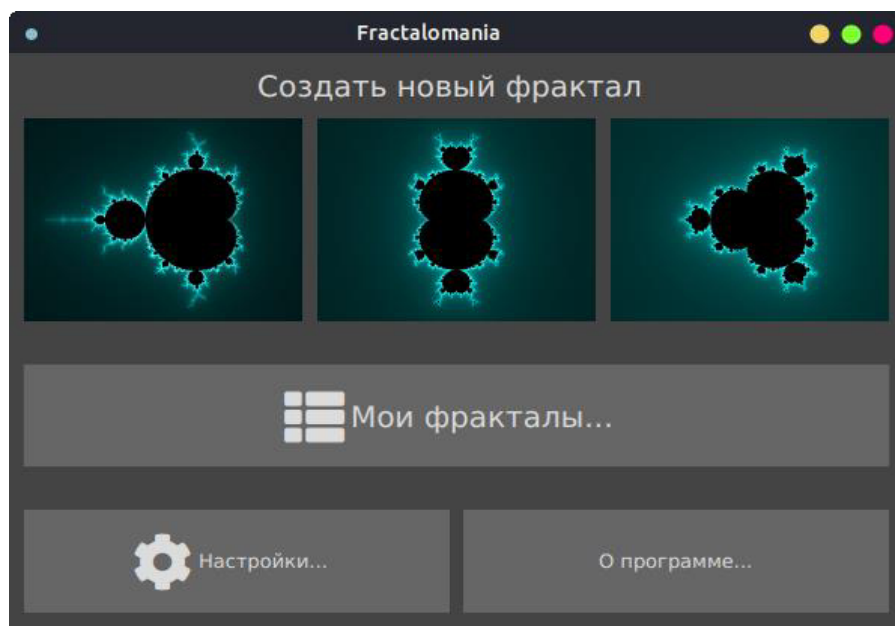


Рис. 1. Главное окно программы Fractalomania

Fig. 1. The main window of the Fractalomania program

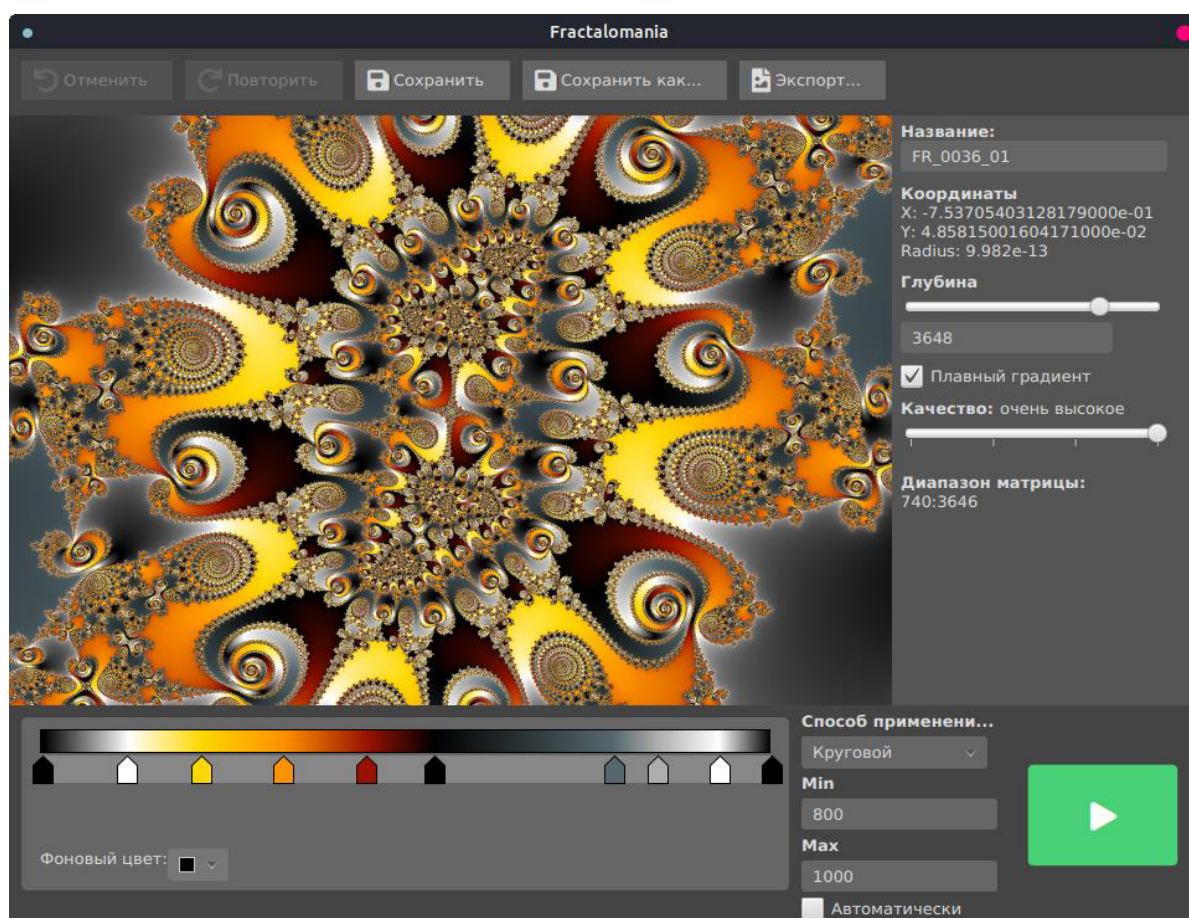


Рис. 2. Окно редактирования фрактала

Fig. 2. Fractal editing window

Принцип применения палитры будет описан далее в алгоритме генерации фрактального изображения.

Одним из важных параметров является глубина прорисовки фрактала (задаваемая параметром «Глубина» в интерфейсе пользователя). Величина этого параметра определяет максимальное

количество итераций рекурсивной формулы при генерации фрактала. Рассмотрим влияние этого параметра на полученное изображение (рис. 3).

Флажок «Плавный градиент» включает режим перехода цвета со ступенчатого на более плавный (рис. 4).

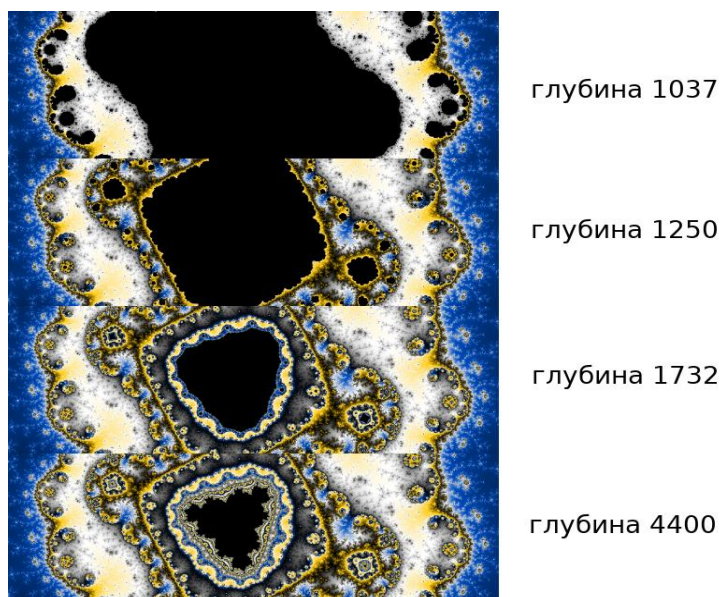


Рис. 3. Влияние значения глубины прорисовки на итоговое изображение

Fig. 3. The effect of the drawing depth value on the final image

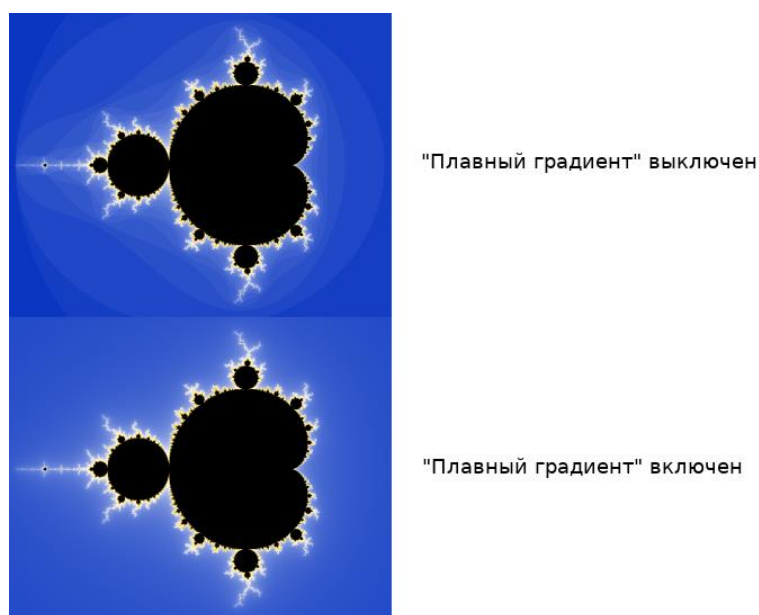


Рис. 4. Влияние режима «Плавный градиент» на итоговое изображение

Fig. 4. The effect of the "Smooth Gradient" mode on the final image

Таким образом, изменяя указанные параметры, можно добиться желаемого визуального эффекта.

Также имеется возможность сохранить фрактал в локальном хранилище с

указанием его названия. На рисунке 5 показано окно списка сохранённых фракталов.

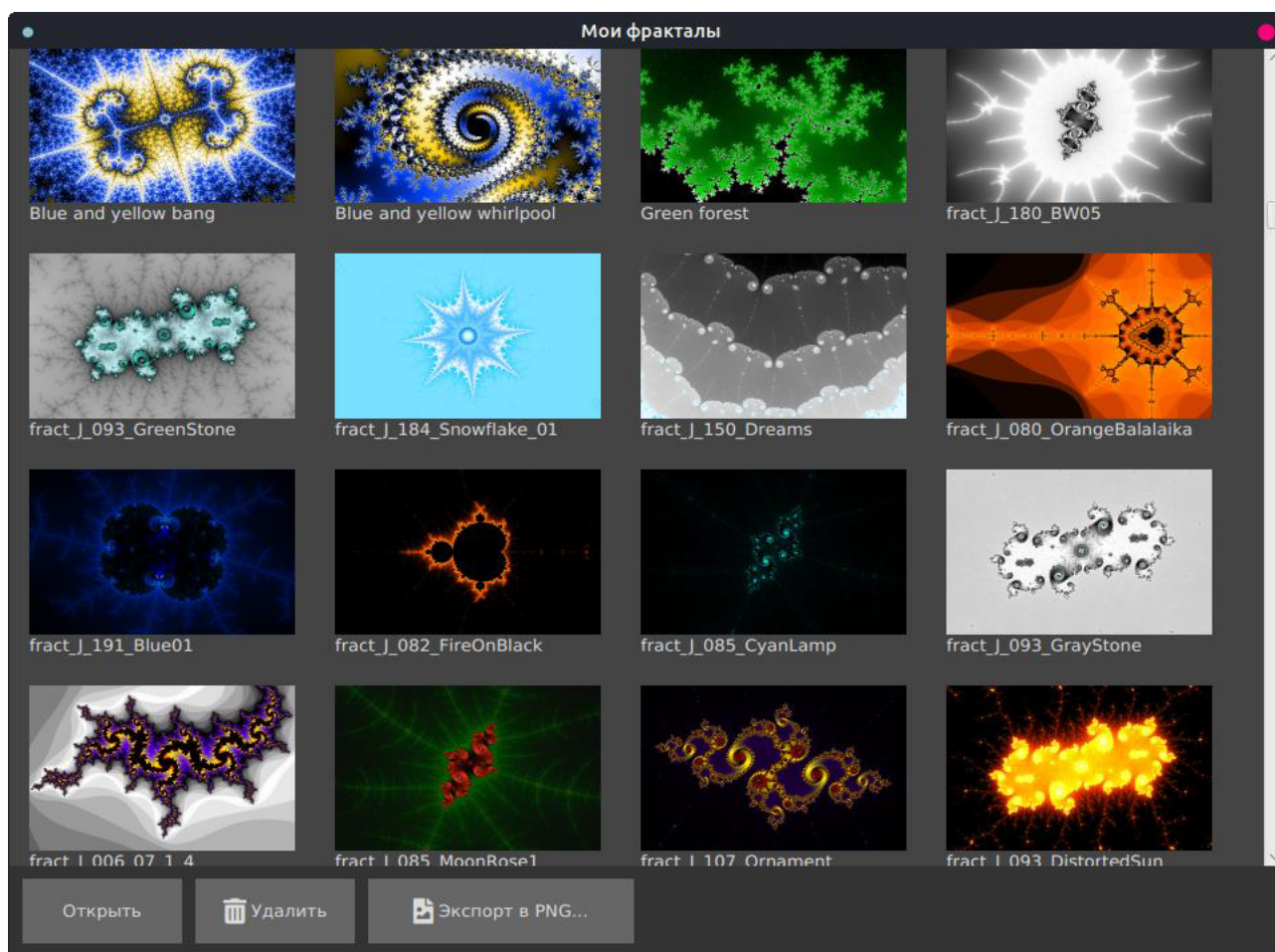


Рис. 5. Сохранённые фракталы

Fig. 5. Stored fractals

Сохранённые ранее фракталы можно открывать снова для редактирования, создавать на их основе новые, а также экспортировать в файлы формата PNG. Экспортировать изображение можно также из окна редактирования фрактала.

Алгоритм генерации фрактального изображения. Визуализация фрактала происходит в два этапа:

• *Первый этап* – расчёт матрицы.

На этом этапе заданный участок координатной плоскости разбивается на одинаковые квадратные участки по количеству пикселей итогового изображения. Затем для каждого такого участка происходит расчёт целочисленного значения. Для расчёта выбирается точка, являющаяся центром квадрата. Для расчёта значения этой точки используется

уже упомянутая рекурсивная формула (1):

$$Z_{n+1} = Z_n^k + C,$$

где Z и C – комплексные числа, причём Z_0 равно 0; C – координаты точки, для которой производится расчёт, в виде комплексного числа; k равно 2, 3 или 4 (в зависимости от выбранного пользователем типа фрактала).

По этой формуле производится расчёт последовательности, который останавливается в одном из двух случаев:

1) модуль очередного рассчитанного значения $Z_n + 1$ больше некоторого предела (обычно равного 2). Тогда итоговым значением точки является номер итерации, на котором это произошло, т. е. n ;

2) достигнуто максимальное количество итераций (равное заданному пользователем параметру «Глубина»). Тогда считается, что данная точка лежит внутри множества Мандельброта, и у неё нет никакого значения.

Таким образом, после первого этапа мы имеем матрицу чисел, размер которой равен размеру итогового изображения в пикселях (т. е. имеем одно число на каждый пиксель изображения). Причём все числа находятся в диапазоне от 0 до значения параметра «Глубина», задаваемого в интерфейсе программы (рис. 6). Кроме элементов, соответствующих точкам, находящимся внутри множества, элементы матрицы, соответствующие точкам внутри множества, считаются пустыми.

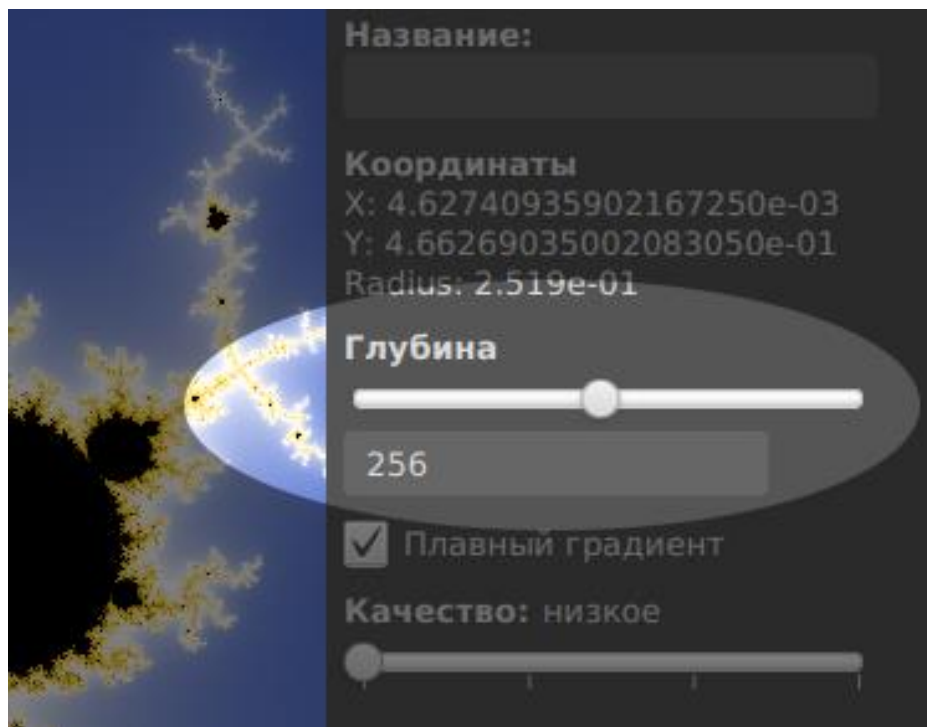


Рис. 6. Параметр «Глубина» задаёт максимальное количество итераций при расчёте матрицы

Fig. 6. The "Depth" parameter sets the maximum number of iterations when calculating the matrix

• *Второй этап* – раскрашивание. На этом этапе каждому целочисленному значению матрицы присваивается свой цвет из заданной палитры. Для присвоения конкретного значения цвета каждому значению из полученной на первом

этапе матрицы палитра как бы «накладывается» на диапазон чисел. Диапазон наложения палитры, который задаётся параметрами *min* и *max*, изображен ниже (рис. 7).

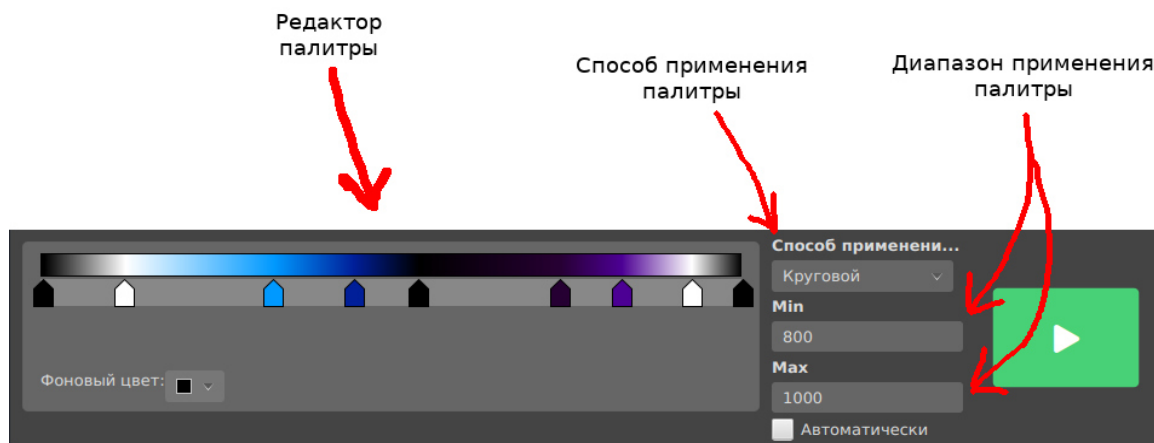


Рис. 7. Редактор палитры и задание параметров её применения

Fig. 7. Palette editor and setting parameters for its application

При этом начало палитры (левый край в редакторе палитры) соответствует минимальному значению диапазона, а конец палитры – максимальному

значению, как на рисунке 8. Промежуточные значения соответственно интерполируются.

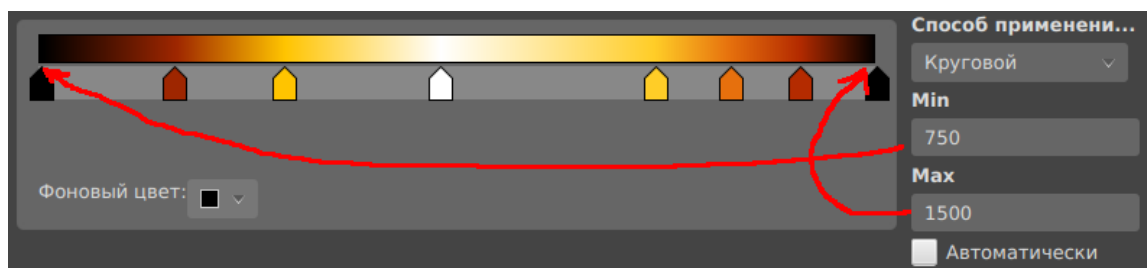


Рис. 8. Палитра накладывается на заданный диапазон значений

Fig. 8. The palette is superimposed on the specified range of values

При использовании данного метода наложения необходимо решить, как быть со значениями, выходящими за пределы диапазона наложения.

Для этого предусмотрено два способа применения палитры – простой и круговой. При простом способе для таких значений матрицы два крайних

цвета, соответствующие минимальному и максимальному значению диапазона, как бы продолжают в бесконечность влево и вправо от крайних значений. При круговом способе палитра просто бесконечно повторяется влево и вправо. Схема представлена ниже (рис. 9).

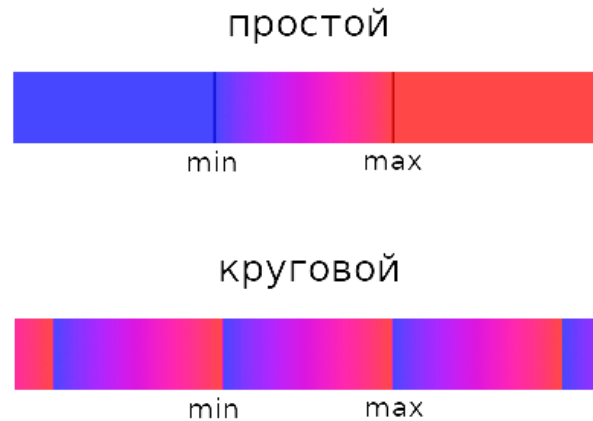


Рис. 9. Два способа применения палитры

Fig. 9. Two ways to apply the palette

Точки, принадлежащие множеству Мандельброта (т. е. те, для которых значения в матрице пустые), окрашиваются в фоновый цвет (задаваемый также в редакторе палитры).

Результаты и их обсуждение

При генерации фрактального изображения описанным выше способом итоговое изображение будет иметь заметные дефекты, выглядящие как

«шум», особенно заметные на более сложных участках фрактала. Пример представлен ниже (рис. 10).

Это связано с тем, что фрактал имеет сложную структуру, при расчёте значения элемента матрицы алгоритм может попасть в точку, значение которой (а соответственно и цвет) будет заметно отличаться от среднего значения окружающих точек.

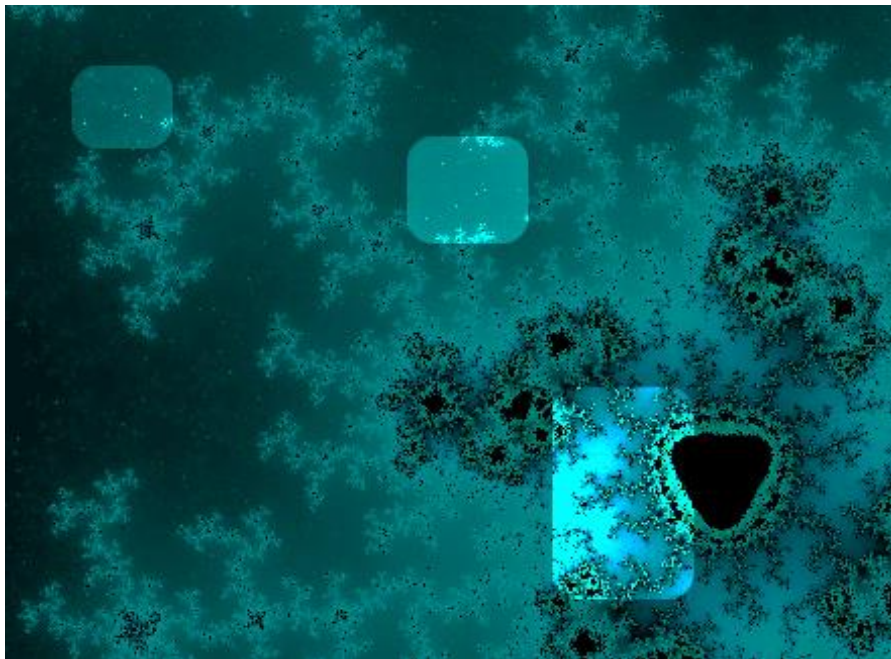


Рис. 10. Пример шумов на итоговом изображении

Fig. 10. Example of noise in the final image

Так происходит из-за того, что точки комплексной плоскости, лежащие близко к границе множества Мандельброта (но не входящие в него), являются точками бифуркации, т. е. при сколь

угодно малом смещении характер их поведения может резко меняться. Схематично принцип появления шумов представлен ниже (рис. 11).

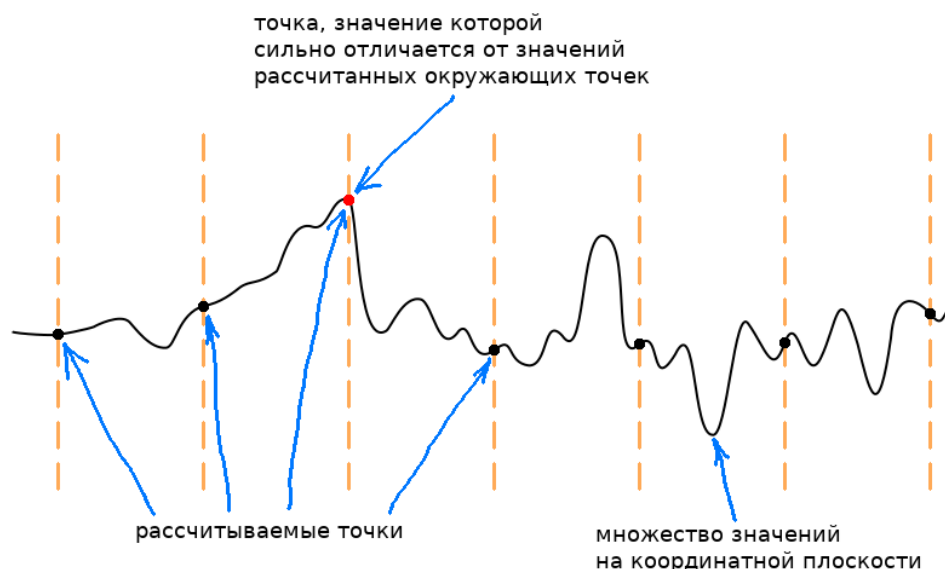


Рис. 11. Принцип появления шумов на сгенерированном изображении

Fig. 11. The principle of the appearance of noise in the generated image

На рисунке 11 направление взгляда находится в комплексной плоскости XY , а рассчитанные значения точек отложены на оси Z , т. е. мы видим как бы «разрез» поверхности, представляющей множество значений.

Для уменьшения данного эффекта применяется метод оверсемплинга, заключающийся в выборе меньшего интервала в кратное число раз между рассчитываемыми точками и дальнейшим сжатием размера изображения. В этом случае происходит генерация изображения с разрешением, кратно превышающим требуемое. На этом изображении также будут шумы. Затем следует

сжатие полученного изображения до требуемого разрешения. В итоге после уменьшения разрешения изображения цвета соседних точек усредняются, и изображение получается более ровным (рис. 12).

Уровень оверсемплинга задаётся параметром «Качество» в окне редактирования фрактала, элемент интерфейса представлен ниже (рис. 13), где «низкое» качество соответствует отсутствию оверсемплинга, «очень высокое» – множителю 4 (т. е. генерируется промежуточное изображение с разрешением в 4 раза большим требуемого, а затем происходит сжатие до требуемого размера).



Рис. 12. Влияние оверсемплинга на итоговое изображение

Fig. 12. The effect of oversampling on the final image

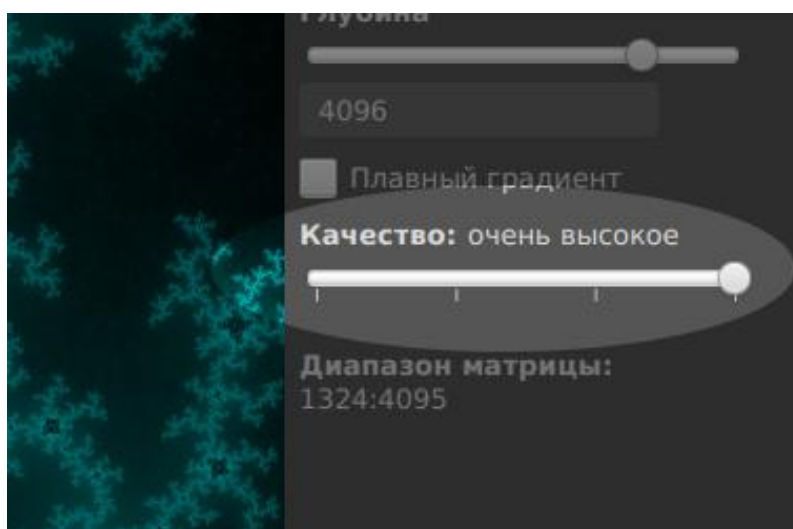


Рис. 13. Выбор качества итогового изображения

Fig. 13. Selecting the quality of the final image

Уровень оверсемплинга значительно влияет на скорость генерации фрактала, так как размер рассчитываемой матрицы увеличивается пропорционально квадрату множителя.

Выводы

Рассмотренная в данной статье программа Fractalomania реализует базовые функции визуализации множества

Мандельброта, основанные на самоподобии и масштабируемости фракталов, что позволяет экспортировать полученные фрактальные изображения для моделирования процессов в виртуальной дополненной реальности.

В перспективе разработанный программный продукт может быть доработан и оснащен новым функционалом, способным предоставить пользователю

возможность создавать объекты, имеющие фрактальную форму. Такая доработка позволит использовать программу для создания моделей, предназначенных

для анализа больших данных, а также для применить для обработки сложно-структурируемых медицинских изображений.

Список литературы

1. Новейшие методы обработки изображений / А. А. Потапов [и др.]; под ред. А. А. Потапова. М.: Физматлит, 2008. 496 с.
2. Фисенко В. Т., Фисенко Т. Ю. Исследование методов распознавания образов для систем компьютерного зрения роботов // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 5. С. 63–70.
3. Русанова И. А. Возможности фрактальной обработки изображений и сигналов в медицине. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 140 с.
4. Бак П. Как работает природа. Теория самоорганизованной критичности. М.: URSS: Либроком, 2022. 288 с.
5. Деменок С. Л. Фрактал. Между мифом и ремеслом. М.: Ринвол, Академия исследования культуры, 2011. 296 с.
6. Методы и алгоритмы контурного анализа для задач классификации сложноструктурируемых изображений / М. В. Дюдин, А. Д. Поваляев, Е. С. Подвальный, Р. А. Томакова // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10, № 3-1. С. 54–59.
7. Метод классификации рентгенограмм на основе использования глобальной информации об их структуре / Р. А. Томакова, М. В. Томаков, И. В. Дураков, В. В. Жилин // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. № 9. С. 45–51.
8. Томакова Р. А., Дюдин М. В., Томаков М. В. Нейросетевые модели принятия решений для диагностики заболеваний легких на основе флюорограмм грудной клетки // Биомедицинская радиоэлектроника. 2014. № 9. С. 12–15.
9. Брежнева А. Н., Томакова Р. А., Филист С. А. Спектральный анализ сегментов изображения глазного дна для количественной оценки сосудистой патологии // Биомедицинская радиоэлектроника. 2009. № 6. С. 15–18.
10. Мандельброт Б. Б. Фракталы и хаос. Множество Мандельброта и другие чудеса. М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2009. 392 с.
11. Деменок С. Л. Просто фрактал. М.: Страта, 2018. 308 с.
12. Секованов В. С. Элементы теории фрактальных множеств. М.: Едиториал УРСС, 2018. 248 с.
13. Гуц А. К. Комплексный анализ и кибернетика. М.: ЛКИ, 2010. 144 с.
14. Мандельброт Б. Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2010. 676 с.

15. Божокин С. В., Паршин Д. А. Фракталы и мультифракталы. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. 128 с.
16. Прохоренок Н. А. Основы Java. СПб.: БХВ-Петербург, 2017. 704 с.
17. Прохоренок Н. А. JavaFX. СПб.: БХВ-Петербург, 2020. 768 с.
18. Васильев А. Н. Java. Объектно-ориентированное программирование. СПб.: Питер, 2012. 398 с.
19. Роберт Лафоре. Структуры данных и алгоритмы в Java. СПб.: Питер, 2016. 704 с.
20. Нимейер П., Леук Д. Программирование на Java. М.: Эксмо, 2014. 1216 с.

References

1. Potapov A. A., eds. Novejshie metody obrabotki izobrazhenij [The latest methods of image processing]; ed. by A. A. Potapov. Moscow, Fizmatlit, 2008. 496 p.
2. Fisenko V. T., Fisenko T. Y. Issledovanie metodov raspoznavaniya obrazov dlya sistem komp'yuternogo zreniya robotov [Investigation of pattern recognition methods for robot computer vision systems]. *Ivestiya vuzov. Priborostroenie = Ivestia of Universities. Instrumentation*, 2013, vol. 56, no. 5, pp. 63–70.
3. Rusanova I. A. Vozmozhnosti fraktal'noj obrabotki izobrazhenij i signalov v medicine [Possibilities of fractal processing of images and signals in medicine]. Moscow, LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 140 p.
4. Bak P. Kak rabotaet priroda. Teoriya samoorganizovannoj kritichnosti [How nature works. Theory of self-organized criticality]. Moscow, URSS, Librocom Publ., 2022. 288 p.
5. Demenok S. L. Fraktal. Mezhdru mifom i remeslom [Fractal. Between myth and craft]. Moscow, Rinvol, Academy of Culture Research Publ., 2011. 296 p.
6. Dyudin M. V., Povalyaev A. D., Podvalny E. S., Tomakova R. A. Metody i algoritmy konturnogo analiza dlya zadach klassifikacii slozhnostrukturiruemih izobrazhenij [Methods and algorithms of contour analysis for classification problems of complex structured images]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2014, vol. 10, no. 3-1, pp. 54–59.
7. Tomakova R. A., Tomakov M. V., Durakov I. V., Zhilin V. V. Metod klassifikacii rentgenogramm na osnove ispol'zovaniya global'noj informacii ob ih strukture [Method of classification of radiographs based on the use of global information about their structure]. *Biomedicinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2016, no. 9, pp. 45–51.
8. Tomakova R. A. Dyudin M. V., Tomakov M. V. Nejrosetevye modeli prinyatiya reshenij dlya diagnostiki zabolevanij legkih na osnove flyuorogramm grudnoj kletki [Neural network models of decision-making for the diagnosis of lung diseases based on chest fluorograms]. *Biomedicinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2014, no. 9, pp. 12–15.

9. Brezhneva A. N., Tomakova R. A., Filist S. A. Spektral'nyj analiz segmentov izobrazheniya glaznogo dna dlya kolichestvennoj ocenki sosudistoj patologii [Spectral analysis of fundus image segments for quantitative assessment of vascular pathology]. *Biomedicinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2009, no. 6, pp. 15–18.
10. Mandelbrot B. B. Fraktaly i haos. Mnozhestvo Mandel'brot'a i drugie chudes'a [Fractals and chaos. The Mandelbrot set and other miracles]. Moscow, Regular and chaotic dynamics Publ., 2009. 392 p.
11. Demenok S. L. Prosto fraktal [Simply fractal]. Moscow, Strata Publ., 2018. 308 p.
12. Sekovanov V. S. Elementy teorii fraktal'nyh mnozhestv [Elements of the theory of fractal sets]. Moscow, Unitorial URSS Publ., 2018. 248 p.
13. Guts A. K. Kompleksnyj analiz i kibernetika [Complex analysis and cybernetics]. Moscow, LKI Publ., 2010. 144 p.
14. Mandelbrot B. B. Fraktal'naya geometriya prirody [Fractal geometry of nature]. Moscow, Institute of Computer Research Publ., 2010. 676 p.
15. Bozhokin S. V., Parshin D. A. Fraktaly i mul'tifraktaly [Fractals and multifractals]. Izhevsk, Regular and chaotic dynamics Publ., 2001. 128 p.
16. Prokhorenok N. A. Osnovy Java [Fundamentals of Java]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2017. 704 p.
17. Prokhorenok N. A. [JavaFX]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2020. 768 p.
18. Vasiliev A. N. Ob"ektno-orientirovannoe programmirovaniye [Java. Object-oriented programming]. St. Petersburg, Peter Publ., 2012. 398 p.
19. Laforet R. Struktury dannyh i algoritmy v Java [Data structures and algorithms in Java]. St. Petersburg, Peter Publ., 2016. 704 p.
20. Niemeyer P., Leuk D. Programmirovaniye na Java [Programming in Java]. Moscow, Eksmo Publ., 2014. 1216 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Томакова Римма Александровна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: rtomakova@mail.ru, Researcher ID: O-6164-2015, ORCID: 0000-0003-152-4714

Rimma A. Tomakova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: rtomakova@mail.ru, Researcher ID: O-6164-2015, ORCID: 0000-0003-152-4714

Ахмадуллин Ильдар Музгирович, магистрант кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ildar.230@yandex.ru

Ildar M. Akhmadullin, Undergraduate of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ildar.230@yandex.ru

Нефедов Никита Геннадьевич, магистрант кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: niknefed@gmail.com, ORCID: 0009-0004-2667-2662

Nikita G. Nefedov, Undergraduate of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: niknefed@gmail.com, ORCID: 0009-0004-2667-2662

Пузырев Евгений Игоревич, магистрант кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: puzyryov2000@mail.ru, ORCID: 0009-0008-5967-8744

Evgeny I. Puzyrev, Undergraduate of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: puzyryov2000@mail.ru, ORCID: 0009-0008-5967-8744

Малышев Антон Александрович, студент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alta76@yandex.ru, ORCID: 0009-0001-4838-6710

Anton A. Malyshev, Student of the Department of Software Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: alta76@yandex.ru, ORCID: 0009-0001-4838-6710

Метод формирования линейных шкал оценки результатов обучения с контролем адекватности индикаторных переменных

А. А. Маслак¹ ✉, А. И. Коробко¹

¹ Филиал Кубанского государственного университета в г. Славянске-на-Кубани
ул. Кубанская, д. 200, г. Славянск-на-Кубани 353560, Российская Федерация

✉ e-mail: anatoliy_maslak@mail.ru

Резюме

Целью исследования является конструирование линейной шкалы для оценки результатов обучения и оценка релевантности индикаторных переменных, участвующих в формировании шкалы.

Методы. Анализ существующих подходов к оцениванию компетенций показал, что наиболее эффективным подходом является деятельностный подход, предполагающий оценку компетенций как результат текущего, рубежного и/или итогового контроля по дисциплине или группе дисциплин. Для этого необходима шкала – измерительный инструмент, позволяющий оценить уровень знаний по данной компетенции. Качество измерительного инструмента оценивалось в рамках теории латентных переменных на основе модели Раша. Использовалась интерактивная среда «Измерение латентных переменных», разработанная в лаборатории объективных измерений Кубанского государственного университета, и программное обеспечение RUMM 2020, которое широко применяется в нашей стране для обработки результатов тестирования обучающихся.

Результаты. Для универсальной компетенции «Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни» разработано программное обеспечение и пул тестовых заданий. В рамках теории латентных переменных протестирована валидность линейной шкалы для этой компетенции. Определены индикаторы линейной шкалы, которые наиболее адекватно характеризуют качество оценки уровня знаний, выявлены индикаторы с наибольшей и наименьшей чувствительностью к уровню знания по этой компетенции.

Заключение. Разработанная линейная шкала оценки результатов обучения использована для измерения уровня сформированности универсальной компетенции УК-6 у студентов Кубанского государственного университета. Полученные результаты необходимы для мониторинга формирования компетенции УК-6 и для определения факторов, влияющих на формирование этой компетенции.

Ключевые слова: образовательная компетенция; конструирование опросника; измерение; линейная шкала; модель Раша.

Благодарности: Авторы выражают благодарность руководству Кубанского государственного университета за предоставление необходимых ресурсов для проведения данного исследования.

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

Для цитирования: Маслак А. А., Коробко А. И. Метод формирования линейных шкал оценки результатов обучения с контролем адекватности индикаторных переменных // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 131–147. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-131-147>.

Поступила в редакцию 10.10.2023

Подписана в печать 07.11.2023

Опубликована 22.12.2023

Method for Forming Linear Scales for Assessing Learning Outcomes with Control of the Adequacy of Indicator Variables

Anatoly A. Maslak¹ ✉, Anatoly I. Korobko¹

¹ Branch of the Kuban State University in Slavyansk-on-Kuban
200 Kubanskaya Str., Slavyansk-on-Kuban 353560, Russian Federation

✉ e-mail: anatoliy_maslak@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to construct a linear scale for assessing learning outcomes, and to assess the relevance of the indicator variables involved in the formation of the scale.

Methods. An analysis of existing approaches to assessing competencies has shown that the most effective approach is the activity-based approach, which involves assessing competencies as a result of current, milestone and/or final control in a discipline or group of disciplines. For this, a scale is needed – a measuring tool that allows you to assess the level of knowledge in a given competency. The quality of the measurement instrument was assessed within the framework of latent variable theory based on the Rasch model. We used the interactive environment “Measurement of Latent Variables, developed in the laboratory of objective measurements of Kuban State University, and the RUMM 2020 software, which is widely used in our country for processing student testing results.

Results. For the universal competence Able to manage one’s time, build and implement a trajectory of self-development based on the principles of lifelong education, software and a pool of test tasks have been developed. Using latent variable theory, the validity of a linear scale for this competency was tested. Linear scale indicators have been identified that most adequately characterize the quality of knowledge level assessment, and indicators with the greatest and least sensitivity to the level of knowledge in this competency have been identified.

Conclusion. The developed linear scale for assessing learning outcomes was used to measure the level of development of the universal competence UC-6 among students of Kuban State University. The results obtained are necessary for monitoring the formation of the UC-6 competence and for determining the factors influencing the formation of this competence.

Keywords: educational competence; questionnaire design; measurement; linear scale; Rasch model.

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the leadership of Kuban State University for providing the necessary resources to conduct this research.

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

For citation: Maslak A. A., Korobko A. I. Method for Forming Linear Scales for Assessing Learning Outcomes with Control of the Adequacy of Indicator Variables. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(4): 131–147. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-131-147>.

Received 10.10.2023

Accepted 07.11.2023

Published 22.12.2023

Введение

В современном образовании акцент сделан на объективную оценку результатов обучения. При внедрении компетентного подхода в высшее образование все большую значимость приобретает оценка уровня подготовленности студентов. Это объясняется тем, что современное обучение является междисциплинарным и ориентировано не только на знания, умения, навыки, но и на способность студентов использовать их на практике [1; 2; 3].

Кроме того, при определении качества высшего образования уровень сформированности компетенций студентов является определяющим. Поэтому оценке уровня сформированности компетенций уделяется большое внимание, и способы оценивания широко обсуждаются во всех образовательных системах [4; 5; 6]. Благодаря объективному оцениванию у студентов формируется адекватная самооценка и критическое отношение к своим результатам, что является важным стимулом для обучения [7].

Существуют различные подходы к оцениванию компетенций. Все большую популярность для оценивания компетенций приобретает деятельностный подход в образовании, предполагающий оценку компетенций как результат текущего, рубежного и/или итогового

контроля по дисциплине или группе дисциплин. Выделим некоторые из них. При этом в качестве способов оценки определяются тестирование, деловая игра, эссе, решение компетентностных задач.

1. *Эссе*. В качестве способа оценки сформированности компетенций на занятиях по иностранному языку предлагается использовать эссе, которое позволяет выделять наиболее важные аспекты и аргументировать свой ответ [7; 8]. Для написания эссе необходимы такие важные качества, как поиск и систематизация необходимой информации, что важно для приобретения креативного мышления [9; 10].

2. *Кейс-метод*. Необходимо отметить, что в связи с внедрением компетентного подхода все большую роль методика кейс-обучения. Суть кейс-метода состоит в совместном анализе преподавателя и студентов провести анализ конкретных ситуаций с целью выработки оптимальных решений. В результате происходит формирование компетенций в соответствующей предметной области [11; 12]. Для реализации этого подхода требуется разработка достаточно большого количества кейсов в предметной области [13].

3. *Портфолио*. Формально портфолио – это собрание достижений студентов в учебной деятельности, научной

работе, общественной жизни и других областях. Однако роль портфолио значительно больше, оно используется для структурирования учебных программ при разработке технологий обучения [14]. Необходимо также отметить способ оценивания компетенции студентов на основе технологии веб-квест [15].

4. *Классическое тестирование.* Это наиболее популярный способ оценивания уровня подготовленности студентов. Популярность этого метода объясняется, прежде всего, технологичностью обработки результатов тестирования и наглядностью интерпретации полученных результатов [16; 17]. Особенности этого метода оценивания в различных экспериментальных ситуациях подробно рассмотрены в монографии [18].

В отличие от всех рассмотренных способов оценивания в рамках этой теории уровень подготовленности студентов измеряется на линейной (интервальной) шкале. Новизна предлагаемого подхода состоит в следующем. В действующих ФГОС оценку уровня сформированности каждой компетенции необходимо определить на трехбалльной шкале Лайкерта: «пороговый уровень», «базовый уровень», «продвинутый уровень». Недостаток такого подхода состоит в том, что, во-первых, не определены критерии оценивания каждого уровня. Во-вторых, шкала Лайкерта является ранговой, что не позволяет корректно проводить мониторинг формирования компетенций. В рамках теории латентных переменных шкала измерения является линейной, что позволяет использовать широкий класс статистических процедур

необходимых для выявления факторов, влияющих на качество образования, проведения мониторинга и решения многих других задач. Эта теория становится все более популярной в области образования. Кроме того, в рамках этой теории определяется валидность опросников [19; 20; 21]. Преимущества оценок, получаемых на основе модели Раша по сравнению с классической теорией тестирования, подробно рассмотрены в работах [22; 23]. Наиболее полно теория измерения латентных переменных представлена в монографиях [24; 25].

Цель данной работы состоит в конструировании опросника для измерения на линейной шкале уровня сформированности универсальной компетенции УК-6 «Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни».

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать набор индикаторов и проверить их на экспертную валидность;
- проверить сформированный набор индикаторов на конструктивную валидность в рамках теории латентных переменных.

Материалы и методы

Разработка опросника для измерения уровня сформированности универсальной компетенции УК-6 «Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в

течение всей жизни» осуществляется в рамках теории латентных переменных на основе модели Раша. Авторами проведены работы по анализу точности измерения латентных переменных на основе модели Раша [26; 27; 28]. Кроме того, в лаборатории объективных измерений есть опыт использования этой теории в различных экспериментальных ситуациях [29; 30].

Важным достоинством теории измерения латентных переменных по сравнению с классической теорией тестирования является проверка совместимости используемых индикаторов. Важно также то, что латентная переменная измеряется на линейной шкале, что необходимо для использования многих статистических процедур.

Метод формирования линейных шкал оценки результатов обучения осуществляется в три этапа.

На первом этапе преподавателями и учителями сформированы более 400 индикаторов, которые, по их мнению, характеризуют компетенцию УК-6.

На втором этапе эксперты выбрали индикаторы, наиболее адекватные этой компетенции, таких индикаторов оказалось 47, которые и были включены в опросник. Проведенные ранее исследования на основе имитационного моделирования показали, что такого числа индикаторов достаточно для обеспечения точности оценивания при решении большинства практических задач [31; 32]. Эти два этапа являются неформализованными, т. е. разные группы экспертов

могут составить разные наборы индикаторов. На этих двух этапах фактически определяется содержательная валидность опросника как измерительного инструмента.

Третий этап является формализованным и выполняется в рамках теории латентных переменных. Качество опросника как измерительного инструмента оценивается на основе результатов опроса. На третьем этапе в опросе приняли участие более 500 студентов по направлению подготовки «Педагогическое образование».

Ответы на каждый индикатор по 5-балльной шкале Лайкерта: «строго не согласен», «не согласен», «ни да, ни нет», «согласен», «строго согласен».

Обработка данных опроса осуществлялась в рамках теории латентных переменных с использованием диалоговой системы ИЛП (Измерение латентных переменных) [28]. Использовалось также программное обеспечение RUMM 2020 [33]. В нашей стране широкомасштабным применением этой теории является обработка результатов тестирования при проведении ЕГЭ (Единого государственного экзамена). Например, при правильном ответе на все тестовые задания по математике обучающийся набирает 42 балла. В сертификате же оценка подготовленности оценивается от 0 до 100 баллов. Откуда же берутся 100 баллов? Дело в том, что результаты тестирования обрабатываются в рамках теории латентной переменной и полученные оценки в логитах на основе

линейного преобразования трансформируются в 100-балльную шкалу.

Поскольку все индикаторы оценивались по одной и той же 5-балльной шкале Лайкерта, то использовалась модель измерения латентной переменной с равноотстоящими градациями [24].

Результаты и их обсуждение

Обобщенные результаты измерения компетенции УК-6 представлены ниже (рис. 1).

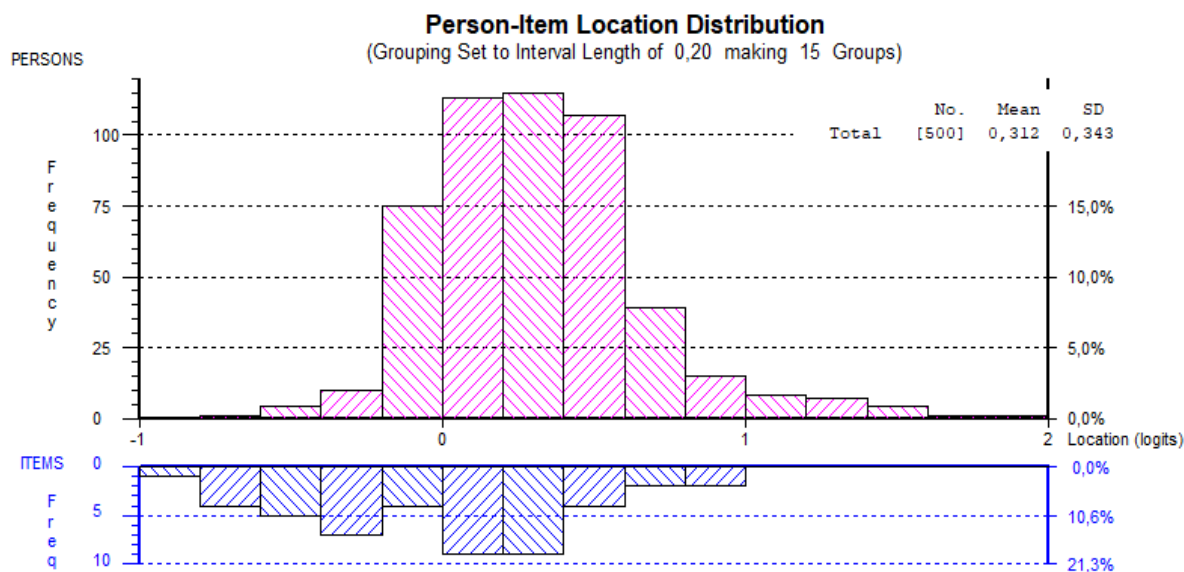


Рис. 1. Оценки студентов и индикаторов на шкале латентной переменной УК-6

Fig. 1. Estimates of students and indicators on the scale of the latent variable UC-6

На рисунке 1 по оси абсцисс откладываются значения латентной переменной УК-6, по оси ординат – в верхней части число студентов, в нижней части – число индикаторов (внизу) с соответствующим значением латентной переменной. С левой стороны оси ординат указаны абсолютные значения числа студентов / индикаторов, с правой стороны – соответствующие относительные значения в процентах от общего числа студентов / индикаторов. В верхней части рисунка 1 указано, что число студентов равно 500, среднее значение

латентной переменной УК-6 на 0,313 логит превышает среднее значение индикаторов, которое в рамках теории латентных переменных по определению равно 0.

Цена деления на оси абсцисс равна 0,20 логит, в результате в интервале от –1,00 до +2,00 логит выделено 15 групп студентов с различными значениями латентной переменной. Как и следовало ожидать, оценки студентов распределены примерно по нормальному закону – небольшое число студентов с высоким и низким уровнями компетенции

УК-6 и большим числом студентов со средним уровнем компетенции.

Полученные оценки измерения уровня сформированности компетенции УК-6 использовались для анализа качества опросника как измерительного инструмента. Выделены следующие основные аспекты:

- наличие в опроснике экстремальных индикаторов;
- совместимость индикаторов в работанном опроснике;
- соответствие средней оценки индикаторов средней оценки студентов по измеряемой компетенции УК-6;
- диапазон варьирования индикаторов.

В результате проведения статистического анализа рассмотрены все указанные выше аспекты.

1. Наличие в опроснике экстремальных индикаторов. Экстремальными индикаторами являются такие, на которые все студенты выбирают минимально или максимально возможные градации. Такие индикаторы являются бесполезными для цели измерения, поскольку они не дифференцируют студентов. Эти индикаторы должны быть исключены. В работанном опроснике экстремальных индикаторов не оказалось.

2. Совместимость набора индикаторов (пунктов опросника). Этот аспект показывает, все ли индикаторы характеризуют одну и ту же латентную переменную, в данном случае компетенцию УК-6. Совместимость индикаторов определяется на основе критерия Хи-

квадрат. Эмпирический уровень значимости этого критерия равен 0,64, что превышает номинальное значение 0,05. Это означает, что результаты опроса адекватны модели измерения. Индекс сепарабельности объектов (студентов) высокий и равен 0,848. Это свидетельствует о высокой дифференциации студентов по измеряемой компетенции УК-6.

3. Соответствие средней оценки индикаторов средней оценке студентов по измеряемой компетенции УК-6. Набор индикаторов должен быть ни слишком легким, ни слишком трудным, иначе опросник будет малоинформативным. В идеальном случае средняя оценка сформированности компетенции УК-6 должна быть равна средней оценке набора индикаторов. В данном случае различие между этими средними равно 0,312 логит (рис. 1). Это различие в пределах ошибки измерения, что означает соответствие трудности опросника уровню сформированности компетенции УК-6 у студентов.

4. Диапазон варьирования индикаторов. Индикаторы варьируются в диапазоне – от –1,00 логит до +1,00 логит. Этот набор индикаторов позволил измерить у студентов компетенцию УК-6 в большом диапазоне – от – 1,00 логит до +2,00 логит.

Для характеристики опросника представляет интерес рассмотреть индикаторы, которые также характеризуют качество опросника:

– индикатор с наибольшей разрешающей способностью студентов с низким уровнем компетенции УК-6;

– индикатор с высокой разрешающей способностью студентов с высоким уровнем компетенции УК-6;

– наиболее адекватный индикатор модели измерения;

– наименее адекватный индикатор модели измерения.

Лучше других дифференцирует студентов с низким уровнем УК-6 индикатор 8 «Интересно ли Вам узнавать себя». Характеристическая кривая этого индикатора представлена ниже (рис. 2).

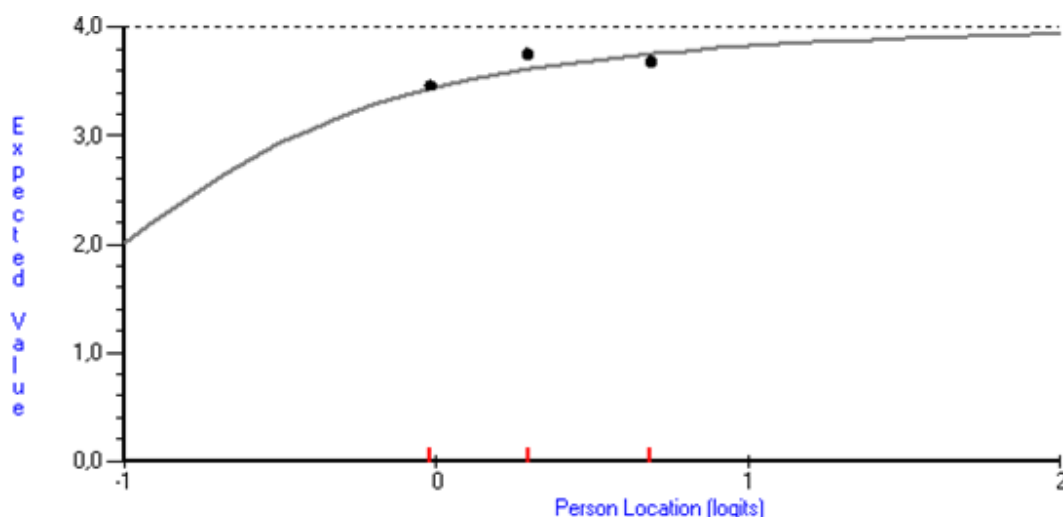


Рис. 2. Характеристическая кривая индикатора 8 «Интересно ли Вам узнавать себя»

Fig. 2. Characteristic curve of the indicator 8 "Are you interested in self-actualization"

В полной мере индикатор характеризуется его характеристической кривой, которая имеет следующую структуру. По оси абсцисс откладывается значение латентной переменной, в данном случае – «уровень сформированности компетенции УК-6» у студента. По оси ординат откладывается ожидаемое значение индикатора (Expected Value). В соответствии с выбранной структурой опросника ожидаемое значение индикатора варьируется от 0 до 4.

Из рисунка 2 видно, что наибольший наклон характеристической кривой находится в области низких значений

латентной переменной. Это и означает, что индикатор 8 дифференцирует студентов с низким уровнем компетенции УК-6.

Индикатор 23 «У меня нет времени ни на семью, ни на друзей» лучше других дифференцирует студентов с высоким уровнем компетенции УК-6 (рис. 3).

Наибольшая крутизна характеристической кривой индикатора находится в области высоких значений УК-6. Таким образом, индикатор 23 лучше других дифференцирует студентов с высоким уровнем компетенции УК-6.

Наиболее адекватным модели измерения (модели Раша) является индикатор 39 «Стараюсь коротко говорить по

телефону». Характеристическая кривая индикатора 39 представлена ниже (рис. 4).

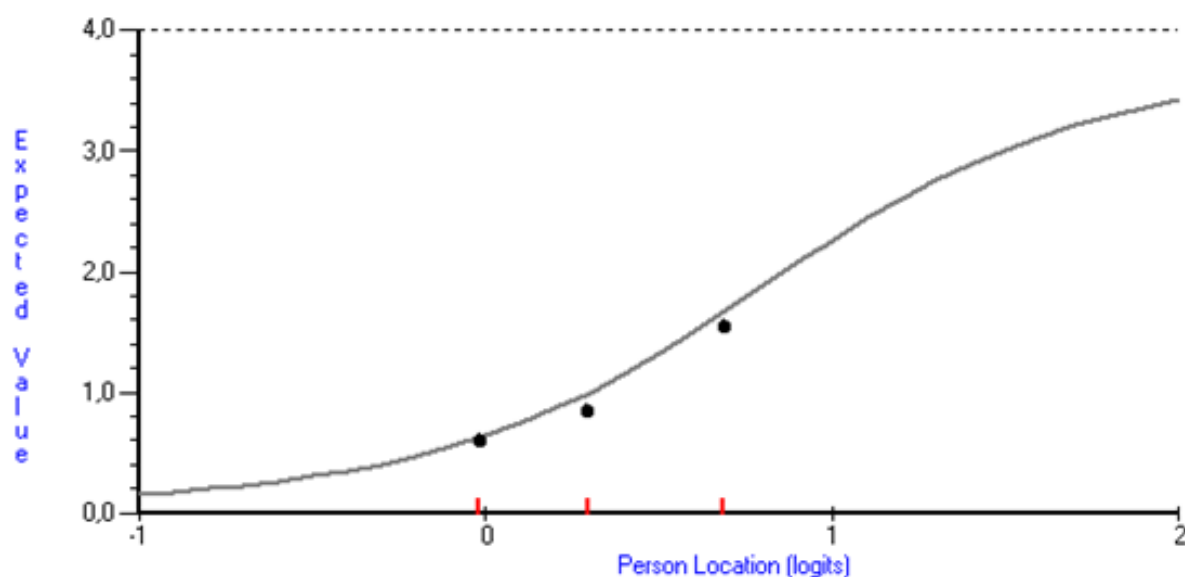


Рис. 3. Характеристическая кривая индикатора 23 «У меня нет времени ни на семью, ни на друзей»

Fig. 3. Characteristic curve of the indicator 23 "I don't have time for my family or my friends"

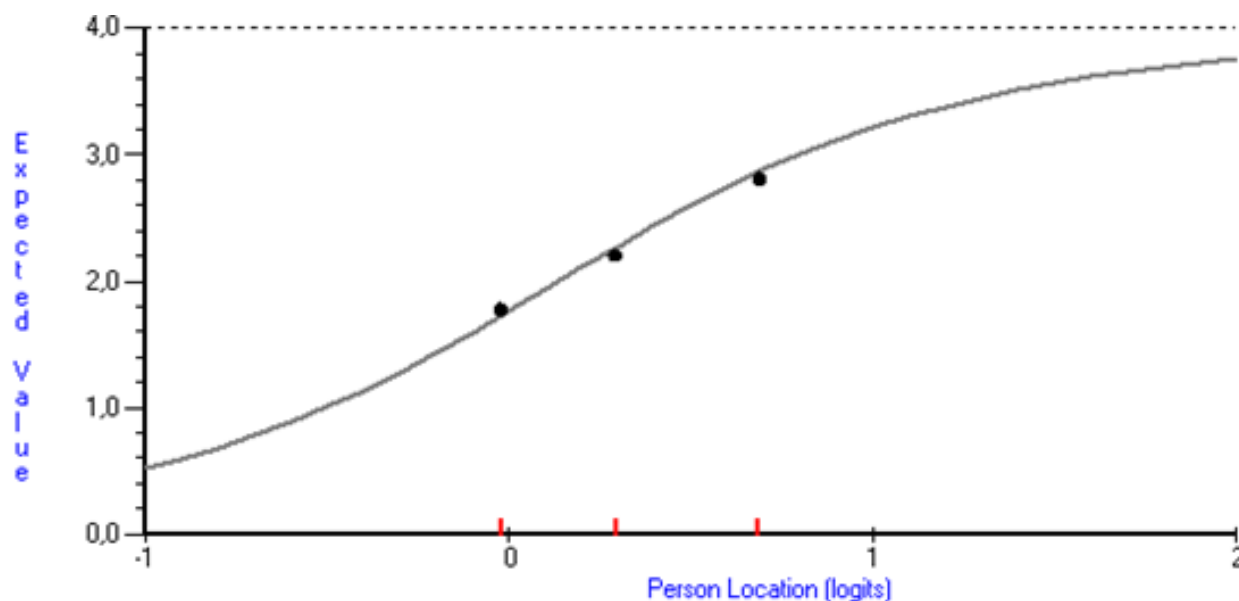


Рис. 4. Характеристическая кривая индикатора 39 «Стараюсь коротко говорить по телефону»

Fig. 4. Characteristic curve of the indicator 39 "I try to talk briefly on the phone"

Как видно из рисунка 4, экспериментальные точки практически совпадают с характеристической кривой.

Наименее адекватным индикатором модели измерения является индикатор 19 «Передо мной постоянно маячит гора незавершенных дел» (рис. 5).

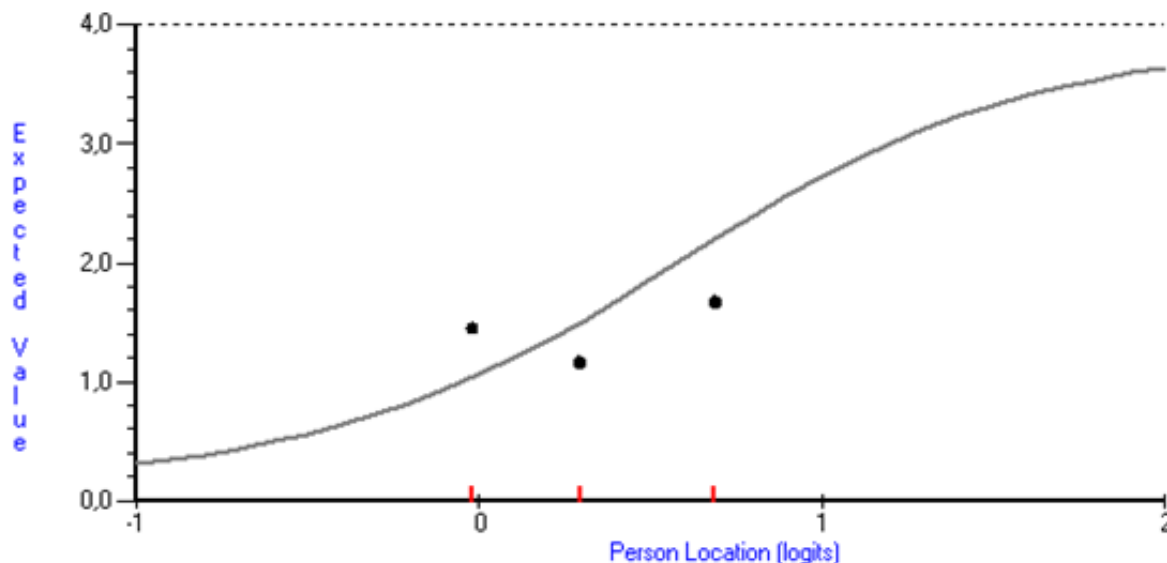


Рис. 5. Характеристическая кривая индикатора 19 «Передо мной постоянно маячит гора незавершенных дел»

Fig. 5. Characteristic curve of the indicator 19 "A mountain of unfinished business constantly looms in front of me"

Рисунок 5 свидетельствует о том, что экспериментальные точки находятся далеко от модели измерения, это подтверждает и низкое значение эмпирического уровня значимости (менее 0,001).

Таким образом, на основе экспериментального исследования установлено, что опросник по всем рассматриваемым аспектам в полной мере удовлетворяет предъявляемым требованиям. Разработанный опросник может использоваться как инструмент для измерения уровня сформированности компетенции УК-6 «Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни».

Количественная оценка предложенного метода состоит в следующем. Во ФГОСе оценка уровня сформированности компетенции УК-6 определяется на трех уровнях – пороговом, базовом и

продвинутом. Недостаток этого подхода состоит в низкой разрешающей способности, студенты классифицируются на три подгруппы. Кроме того, не сформулирован критерий отнесения студента к той или иной подгруппе. Новизна предложенного метода состоит в том, что разработанный опросник позволяет измерить уровень сформированности компетенции на линейной шкале и более точно определить уровень сформированности компетенции. Так, в предложенном методе студенты классифицируются на 15 подгрупп.

Выводы

Разработан опросник для измерения на линейной шкале универсальной компетенции УК-6 «Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение

всей жизни». Все требования, предъявляемые к опроснику как измерительному инструменту, в рамках теории латентных переменных выполнены. Разработанный опросник будет использоваться для измерения уровня сформированности универсальной компетенции УК-6 студентов всех профилей подготовки по направлению «Педагогическое образование». Полученные оценки будут использоваться для мониторинга формирования компетенции УК-6 и для

определения факторов, влияющих на формирование этой компетенции.

Для количественной оценки уровня сформированности компетенции необходимо, чтобы студенты ответили на индикаторы разработанного опросника. Затем с использованием программного обеспечения ИЛП (Измерение латентных переменных) вычисляется уровень сформированности универсальной компетенции у этих студентов.

Список литературы

1. Аглямова З. Ш., Камашева Ю. Л., Шевченко Д. В. Об одном подходе к измерению сформированности компетенций // Азимут научных исследований: педагогика и психология. 2018. Т. 7, № 2(23). С. 15–18.
2. Кузьменко И. В. Оценка сформированности профессиональных компетенций выпускников в свете требований ФГОС ВПО // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2013. Т. 3, № 21. С. 89–91.
3. Михайленко Т. С. Компетентностный подход в оценивании качества результатов обучения студентов // Концепт. 2014. № S22. С. 51–55.
4. Robertson S. I. Global competences and 21st century higher education – And why they matter // International Journal of Chinese Education. 2021. Vol. 10, no. 1. P. 1–8.
5. Jónsson Ó. P., Rodriguez A. G. Educating democracy: Competences for a democratic culture // Education, Citizenship and Social Justice. 2019. Vol. 16, no. 1. P. 62–77.
6. Wagenaar R. Evidencing competence in a challenging world. European higher education initiatives to define, measure and compare learning // International Journal of Chinese Education. 2021. Vol. 10, no. 1. P. 1–13.
7. Семенчук Л. В. Педагогическая оценка как стимул для учащегося. Эффективность педагогической оценки // Школьная педагогика. 2017. Т. 3, № 10. С. 6–8.
8. Колдина М. И., Костылева Е. А., Трутанова А. В. Эссе как способ контроля знаний и оценивания компетенций // Балтийский гуманитарный журнал. 2017. Т. 6, № 3(20). С. 178–180.
9. Жданкина И. Ю., Игнатьева Н. Н. Оценка сформированности компетенций на занятиях по иностранному языку в неязыковых вузах // Kant. 2018. Т. 2, № 27. С. 41–47.

10. Лакман И. А., Иванова А. Д. Перспективы применения кейс-обучения в высшей школе // *Электронное обучение в непрерывном образовании* 2018: V Международная научно-практическая конференция. Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2018. С. 433–440.
11. Быкова Н. И. Исследование «кейс-метода»: Теоретические аспекты. СПб.: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2020. 16 с.
12. Долгоруков А. М. Метод case-study как современная технология профессионально ориентированного обучения. URL: <http://evolkov.net/case/case.study.html> (дата обращения: 18.09.2023).
13. Мирза Н. В., Умпирович М. И. Кейс-метод как современная технология профессионально ориентированного обучения студентов // *European science review*. 2019. № 3–4. С. 82–85.
14. Фролов В. Н., Валишина Д. А. Портфолио как эффективная педагогическая технология в XXI веке // *Молодой ученый*. 2021. Т. 27, № 369. С. 275–278.
15. Остапович О. В., Миллер В. В., Костюнина А. А. Оценивание уровня сформированности общепрофессиональных компетенций будущих педагогов-психологов на основе использования веб-квест технологии // *Сибирский педагогический журнал*. 2017. № 6. С. 93–100.
16. Богульская Н. А., Кучеров М. М. Автоматизированное тестирование как способ оценивания уровня сформированности компетенций студентов на основе исследования действием // *Вестник Красноярского государственного педагогического университета им. В. П. Астафьева*. 2019. Т. 2, № 48. С. 87–93. <https://doi.org/10.25146/1995-0861-2019-47-1-125>.
17. Наумчик Е. Е. Методика оценивания уровня сформированности компетенций в процессе обучения специалистов по эксплуатации вооружения, военной и специальной техники // *Известия Волгоградского государственного педагогического университета*. 2021. Т. 8, № 161. С. 88–96.
18. Stemler S. E., Naples A. Rasch Measurement v. Item Response Theory: Knowing When to Cross the Line // *Practical Assessment, Research, and Evaluation*. 2021. Vol. 26. P. 1–16. <https://doi.org/10.7275/v2gd-4441>.
19. Lim L., Chapman E. Validation of the Moral Reasoning Questionnaire against Rasch Measurement Theory // *Journal of Pacific Rim Psychology*. 2022. Vol. 16. P. 1–26.
20. Papini N., Kang M., Ryu S., Griesse E. Taylor Wingert, Herrmann S. Rasch calibration of the 25-item Connor-Davidson Resilience Scale // *Journal of Health Psychology*. 2020. Vol. 26, N 3. P. 1976–1987.
21. Enoch Teye-Kwadjo, Gideon P. de Bruin Rasch Analysis of the Proactive Personality Scale // *Psychological Rep*. 2022. Vol. 125, N 5. P. 2788–2806.

22. Aryadoust V., Li Ying Ng, Sayama H. A comprehensive review of Rasch measurement in language assessment: Recommendations and guidelines for research // *Language Testing*. 2020. Vol. 38, N 1. P. 6–40.

23. Babcock B., Hodge K. J. Rasch Versus Classical Equating in the Context of Small Sample Sizes // *Educational and Psychological Measurement*. 2019. Vol. 80, N 3. P. 499–521.

24. Andrich D., Marais I. A course in Rasch measurement theory: Measuring in the educational, social and health sciences. Singapore: Springer, 2019. 482 p.

25. Bond T. G., Yan Z., Heene M. Applying the Rasch Model: Fundamental Measurement in the Human Sciences. New York: Routledge, 2020. 376 p.

26. Маслак А. А. О необходимости экспериментальной оценки эффективности педагогических технологий // *Педагогическая информатика*. 1999. № 2. С. 54–61.

27. Исследование точности измерения латентной переменной в зависимости от диапазона варьирования набора индикаторов / А. А. Маслак, С. И. Моисеев, С. А. Осипов, С. А. Поздняков // *Радиоэлектроника, информатика, управление*. 2017. № 1 (40). С. 42–49.

28. Осипов С. А., Маслак А. А. Оценивание параметров модели Раша методом парных сравнений // *Теория и практика измерения компетенций и других латентных переменных в образовании: материалы XV Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции (03–05 февраля 2011 года) и XVI (01–03 июля 2011 года)*. Славянск-на-Кубани: Издательский центр Славянский-на-Кубани государственный педагогический институт, 2011. С. 65–72.

29. Рыбкин А. Д., Маслак А. А. Формирование и мониторинг креативных способностей школьников // *Концепт*. 2016. № S3. С. 76–80.

30. Маслак А. А., Осипов С. А., Поздняков С. А. Измерение и мониторинг уровня жизни населения в регионах Южного федерального округа Российской Федерации // *Теория и практика измерения компетенций и других латентных переменных в образовании: материалы X Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции*. Славянск-на-Кубани: Славянский-на-Кубани государственный педагогический институт, 2008. С. 131–155.

31. Maslak A. A., Usova L.V. Statistical analysis of creative self-efficacy of students depending on their department, grade and gender // 13th annual International Conference of Education, Research and Innovation (ICERI) / edited by L. Gómez Chova, A. López Martínez, I. Candel Torres. Seville: IATED Academy, 2020. P. 0610–0617.

32. Maslak A. Investigation of Measurement Precision of Latent Variables Depending on the Noise Test Results // *Proceeding of the International Scientific Conference*. Rezekne: Rezekne Academy of Technologies, 2019. Vol. 5. P. 422–429.

33. Andrich D., Sheridan B., Luo G. RUMM2020: Rasch Unidimensional Measurement Models software and manual. Perth, Australia: RUMM Laboratory, 2005.

References

1. Aglyamova Z. Sh., Kamasheva Yu. L., Shevchenko D. V. Ob odnom podhode k izmereniyu sformirovannosti kompetencij [On one approach to measuring the formation of competencies]. *Azimut nauchnyh issledovanij: pedagogika i psihologiya = Azimut of Scientific Research: Pedagogy and Psychology*, 2018, vol. 7, no. 2(23), pp. 15–18.
2. Kuzmenko I. V. Ocenka sformirovannosti professional'nyh kompetencij vypusnikov v svete trebovanij FGOS VPO [Assessment of the formation of professional competencies of graduates in the light of the requirements of the Federal State Educational Standard of Higher Education]. *Territoriya novykh vozmozhnostej. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa = Territory of New Opportunities. Bulletin of the Vladivostok State University of Economics and Service*, 2013, vol. 3, no. 21, pp. 89–91.
3. Mikhailenko T. S. Kompetentnostnyj podhod v ocenivanii kachestva rezul'tatov obucheniya studentov [Competence approach in assessing the quality of student learning outcomes]. *Koncept = Concept*, 2014, no. S22, pp. 51–55.
4. Robertson S. I. Global competences and 21st century higher education – And why they matter. *International Journal of Chinese Education*, 2021, vol. 10, no. 1, pp. 1–8.
5. Jónsson Ó. P., Rodriguez A. G. Educating democracy: Competences for a democratic culture. *Education, Citizenship and Social Justice*, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 62–77.
6. Wagenaar R. Evidencing competence in a challenging world. European higher education initiatives to define, measure and compare learning. *International Journal of Chinese Education*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 1–13.
7. Semenchuk L. V. Pedagogicheskaya ocenka kak stimul dlya uchashchegosya. Effektivnost' pedagogicheskoy ocenki [Pedagogical assessment as an incentive for a student. Effectiveness of pedagogical assessment]. *Shkol'naya pedagogika = School pedagogy*, 2017, vol. 3, no. 10, pp. 6–8.
8. Koldina M. I., Kostyleva E. A., Trutanova A. V. Esse kak sposob kontrolya znanij i ocenivaniya kompetencij [Essays as a way of knowledge control and competence assessment]. *Baltiyskij gumanitarnyj zhurnal = Baltic Humanitarian Journal*, 2017, vol. 6, no. 3(20), pp. 178–180.
9. Zhdankina I. Yu., Ignatieva N. N. Ocenka sformirovannosti kompetencij na zanyatiyah po inostrannomu yazyku v neyazykovykh vuzah [Assessment of the formation of competencies in foreign language classes in non-linguistic universities]. *Kant*, 2018, vol. 2, no. 27, pp. 41–47.
10. Lakman I. A., Ivanova A. D. [Prospects for the application of case study in higher education]. *Elektronnoe obuchenie v nepreryvnom obrazovanii 2018. V Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya* [E-learning in continuing education 2018. V International scientific and practical Conference]. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University Publ., 2018, pp. 433–440. (In Russ.)

11. Bykova N. I. Issledovanie "kejs-metoda": Teoreticheskie aspekty [The study of the "case method": Theoretical aspects]. St. Petersburg, St. Petersburg State University of Economics Publ., 2020. 16 p.

12. Dolgorukov A. M. Metod case-study kak sovremennaya tekhnologiya professional'no orientirovannogo obucheniya [The case-study method as a modern technology of professionally oriented training]. Available at: <http://evolkov.net/case/case.study.html>. (accessed 18.09.2023).

13. Mirza N. V., Umpirovich M. I. Kejs-metod kak sovremennaya tekhnologiya professional'no orientirovannogo obucheniya studentov [Case-method as a modern technology of professionally-oriented training of students]. *European science review = European Science Review*, 2019, no. 3-4, pp. 8–85.

14. Frolov V. N., Valishina D. A. Portfolio kak effektivnaya pedagogicheskaya tekhnologiya v XXI veke [Portfolio as an effective pedagogical technology in the XXI century]. *Molodoj uchenyj = Young Scientist*, 2021, vol. 27, no. 369, pp. 275–278.

15. Ostapovich O. V., Miller V. V., Kostyunina A. A. Ocenivanie urovnya sformirovannosti obshcheprofessional'nyh kompetencij budushchih pedagogov-psihologov na osnove ispol'zovaniya veb-kvest tekhnologii [Assessment of the level of formation of general professional competencies of future teachers-psychologists based on the use of web-quest technology]. *Sibirskij pedagogicheskij zhurnal = Siberian Pedagogical Journal*, 2017, no. 6, pp. 93–100.

16. Bogulskaya N. A., Kucherov M. M. Avtomatizirovannoe testirovanie kak sposob ocenivaniya urovnya sformirovannosti kompetencij studentov na osnove issledovaniya dejstviem [Automated testing as a way of assessing the level of formation of students' competencies based on research by action]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. V. P. Astaf'eva = Bulletin of the Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V. P. Astafyev*, 2019, vol. 2, no. 48, pp. 87–93. <https://doi.org/10.25146/1995-0861-2019-47-1-125>.

17. Naumchik E. E. Metodika ocenivaniya urovnya sformirovannosti kompetencij v processe obucheniya specialistov po ekspluatatsii vooruzheniya, voennoj i special'noj tekhniki [Methodology for assessing the level of competence formation in the process of training specialists in the operation of weapons, military and special equipment]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta = Izvestiya Volgograd State Pedagogical University*, 2021, vol. 8, no. 161, pp. 88–96.

18. Stemler S. E., Naples A. Rasch Measurement v. Item Response Theory: Knowing When to Cross the Line. *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, 2021, vol. 26, pp. 1–16. <https://doi.org/10.7275/v2gd-4441>

19. Lim L., Chapman E. Validation of the Moral Reasoning Questionnaire against Rasch Measurement Theory. *Journal of Pacific Rim Psychology*, 2022, vol. 16, pp. 1–26.

20. Papini N., Kang M., Ryu S., Griesse E., Wingert T., Herrmann S. Rasch calibration of the 25-item Connor-Davidson Resilience Scale. *Journal of Health Psychology*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 1976–1987.
21. Enoch Teye-Kwado, Gideon P. de Bruin. Rasch Analysis of the Proactive Personality Scale. *Psychological Reports*, 2022, vol. 125, no. 5, pp. 2788—2806.
22. Aryadoust V., Li Ying Ng, Sayama H. A comprehensive review of Rasch measurement in language assessment: Recommendations and guidelines for research. *Language Testing*, 2020, vol. 38, no. 1, pp. 6–40.
23. Babcock B., Hodge K. J. Rasch Versus Classical Equating in the Context of Small Sample Sizes. *Educational and Psychological Measurement*, 2019, vol. 80, no. 3, pp. 499–521.
24. Andrich D., Marais I. A course in Rasch measurement theory: Measuring in the educational, social and health sciences. Singapore, Springer Publ., 2019. 482 p.
25. Bond T. G., Yan Z., Heene M. Applying the Rasch Model: Fundamental Measurement in the Human Sciences. New York, Routledge Publ., 2020. 376 p.
26. Maslak A. A. O neobhodimosti eksperimental'noj ocenki effektivnosti pedagogicheskikh tekhnologij [On the need for experimental evaluation of the effectiveness of pedagogical technologies]. *Pedagogicheskaya informatika = Pedagogical Informatics*, 1999, no. 2, pp. 54–61.
27. Maslak A. A., Moiseev S. I., Osipov S. A., Pozdnyakov S. A. Issledovanie tochnosti izmereniya latentnoj peremennoj v zavisimosti ot diapazona var'irovaniya nabora indikatorov [Investigation of the precision of measurement of a latent variable depending on the range of variation of set of indicators]. *Radioelektronika, informatika, upravlenie = Radioelectronics, Informatics, Management*, 2017, no. 1 (40), pp. 42–49.
28. Osipov S. A., Maslak A. A. [Estimation of the parameters of the Rasch model by the method of paired comparisons]. *Teoriya i praktika izmereniya kompetencij i drugih latentnyh peremennyh v obrazovanii. Materialy XV Vserossijskoj (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-prakticheskoy konferencii (03–05 fevralya 2011 goda) i XVI (01–03 iyulya 2011 goda)* [Theory and practice of measuring competencies and other latent variables in education. Proceedings of the XV All-Russian (with international participation) Scientific and Practical Conference (February 03–05, 2011) and the XVI century (July 01–03, 2011)]. Slavyansk-on-Kuban, Slavyansk-on-Kuban State Pedagogical Institute Publ., 2011, pp. 65–72. (In Russ.)
29. Rybkin A. D., Maslak A. A. Formirovanie i monitoring kreativnyh sposobnostej shkol'nikov [Formation and monitoring of creative abilities of schoolchildren]. *Koncept = Concept*, 2016, no. S3, pp. 76–80.
30. Maslak A. A., Osipov S. A., Pozdnyakov S. A. [Measurement and monitoring of the standard of living of the population in the regions of the Southern Federal District of the Russian Federation]. *Teoriya i praktika izmereniya kompetencij i drugih latentnyh peremennyh v*

obrazovanii. Materialy X Vserossijskoj (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-prakticheskoy konferencii [Theory and practice of measuring competencies and other latent variables in education. Proceedings of the x All-Russian (with international participation) Scientific and Practical Conference]. Slavyansk-on-Kuban, Slavyansk-on-Kuban State Pedagogical Institute Publ., 2008, pp. 131–155. (In Russ.)

31. Maslak A. A., Usova L. V. Statistical analysis of creative self-efficacy of students depending on their department, grade and gender. 13th annual International Conference of Education, Research and Innovation (ICERI); ed. by L. Gómez Chova, A. López Martínez, I. Candel Torres. Seville, IATED Academy Publ., 2020, pp. 0610–0617.

32. Maslak A. Investigation of Measurement Precision of Latent Variables Depending on the Noise Test Results. Proceeding of the International Scientific Conference. Rezekne, Rezekne Academy of Technologies Publ., 2019, pp. 422–429.

33. Andrich D., Sheridan B., Luo G. RUMM2020: Rasch Unidimensional Measurement Models software and manual. Perth, Australia, RUMM Laboratory Publ., 2005.

Информация об авторе / Information about the Author

Маслак Анатолий Андреевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры математики, информатики, естественно-научных и общетехнических дисциплин, Филиал Кубанского государственного университета в г. Славянске-на-Кубани, г. Славянск-на-Кубани, Российская Федерация, e-mail: anatoliy_maslak@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3189-4858

Anatoly A. Maslak, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Mathematics, Computer Sciences, Natural Sciences and General Technical Disciplines, Branch of the Kuban State University in Slavyansk-on-Kuban, Slavyansk-on-Kuban, Russian Federation, e-mail: anatoliy_maslak@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3189-4858

Коробко Анатолий Иванович, руководитель отделения среднего профессионального образования, Филиал Кубанского государственного университета в г. Славянске-на-Кубани, г. Славянск-на-Кубани, Российская Федерация, e-mail: kubsuslavspo@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3282-8411

Anatoly I. Korobko, Head of the Department of Secondary Vocational Education, Branch of the Kuban State University in Slavyansk-on-Kuban, Slavyansk-on-Kuban, Russian Federation, e-mail: kubsuslavspo@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3282-8411

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-148-174>

УДК 004.89

Технологии биоимпедансной спектроскопии в системах поддержки принятия решений при диагностике социально значимых заболеваний

О. В. Шаталова¹ ✉, Н. С. Стадниченко¹, М. А. Ефремов¹,
И. А. Башмакова¹, А. В. Лях¹, А. В. Серебровский¹

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

✉ e-mail: shatolg@mail.ru

Резюме

Цель исследования – развитие методов синтеза гибридных классификаторов для оценки риска социально значимых заболеваний с использованием биоимпедансного анализа.

Методы. Мы разработали дескрипторный подход, используя результаты импедансной спектроскопии, генерируя четыре амплитудно-фазочастотные характеристики от четырех квазиортогональных отведений. Они создают пространства признаков, необходимые для нашего гибридного классификатора в диагностике заболеваний поджелудочной железы, автономные интеллектуальные агенты которого построены на различных парадигмах: вероятностные нейронные сети; нечеткий логический вывод; полносвязные нейронные сети прямого распространения сигнала. Также мы представили структуру устройства для создания пространства информативных признаков.

Результаты. Экспериментальные исследования предложенных методов и средств классификации медицинского риска были осуществлены на задачах диагностики по классам «острый деструктивный панкреатит» – «нет острого деструктивного панкреатита» и задачах дифференциальной диагностики по классам «рак предстательной железы» – «хронический панкреатит». Они показали, что включение многократного зондирования в классификаторы на основе нейронных сетей позволяет разрабатывать системы поддержки клинических решений для диагностики заболеваний, сопоставимые по показателям эффективности с существующими методами клинической диагностики. Результаты были подтверждены на группах пациентов мужского и женского пола на разных стадиях рака в возрасте от 25 до 80 лет с использованием различных диагностических методов, включая сбор анамнеза, физикальное обследование, оценку сопутствующей патологии, лабораторные исследования, УЗИ, лапароскопию, интраоперационную ревизию и компьютерную томографию.

Заключение. Использование метода биоимпедансной спектроскопии и гибридных моделей классификаторов открывает новые возможности для доступной и объективной диагностики заболеваний поджелудочной железы, расширяя возможности интеллектуальных систем поддержки принятия медицинских решений.

Ключевые слова: спектроскопия биоимпеданса; диагностика и дифференциальная диагностика заболеваний; модели импеданса; нейросетевой классификатор; гибридный классификатор; поджелудочная железа.

Финансирование: Исследования выполнены в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» программы стратегического академического лидерства «Приоритет – 2030».

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

Для цитирования: Технологии биоимпедансной спектроскопии в системах поддержки принятия решений при диагностике социально значимых заболеваний / О. В. Шаталова, Н. С. Стадниченко, М. А. Ефремов, И. А. Башмакова, А. В. Лях, А. В. Серебровский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 148–174. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-148-174>.

Поступила в редакцию 18.10.2023

Подписана в печать 15.11.2023

Опубликована 22.12.2023

Technologies of Bioimpedance Spectroscopy in Decision Support Systems for the Diagnosis of Socially Significant Diseases

Olga V. Shatalova¹ ✉, Nikita S. Stadnichenko¹, Mikhail A. Efremov¹,
Irina A. Bashmakova¹, Anton V. Lyakh¹, Andrey V. Serebrovsky¹

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

✉ e-mail: shatolg@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop methods for the synthesis of hybrid classifiers to assess the risk of socially significant diseases using bioimpedance analysis.

Methods. We developed a descriptor approach using impedance spectroscopy results, generating four amplitude-phase-frequency responses from four quasi-orthogonal leads. They create the feature spaces necessary for our hybrid classifier in the diagnosis of pancreatic diseases, the autonomous intelligent agents of which are built on various paradigms: probabilistic neural networks, fuzzy logical inference, fully connected feedforward neural networks. We also presented a device structure for creating an informative feature space.

Results. Experimental studies of the proposed methods and means of classifying medical rice were carried out on diagnostic tasks according to the classes "acute destructive pancreatitis" – "no acute destructive pancreatitis" and differential diagnosis tasks according to the classes "prostate cancer" – "chronic pancreatitis". They showed that incorporating multi-frequency sensing into neural network-based classifiers allows the development of clinical decision support systems for disease diagnosis that are comparable in performance to existing clinical diagnostic methods. The results were confirmed in groups of male and female patients at different stages of cancer aged 25 to 80 years using a variety of diagnostic methods, including history, physical examination, assessment of comorbidities, laboratory tests, ultrasound, laparoscopy, intraoperative exploration and computed tomography.

Conclusion. The use of bioimpedance spectroscopy and hybrid classifier models opens up new opportunities for accessible and objective diagnosis of pancreatic diseases, expanding the capabilities of intelligent medical decision support systems.

Keywords: bioimpedance spectroscopy; diagnosis and differential diagnosis of diseases; impedance models; neural network classifier; hybrid classifier; pancreas.

Funding: The research was carried out within the framework of the development program of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Southwest State University" of the strategic academic leadership program "Priority – 2030".

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

For citation: Shatalova O. V., Stadnichenko N. S., Efremov M. A., Bashmakova I. A., Lyakh A. V., Serebrovsky A. V. Technologies of Bioimpedance Spectroscopy in Decision Support Systems for the Diagnosis of Socially Significant Diseases. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(4): 148–174. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-148-174>.

Received 18.10.2023

Accepted 15.11.2023

Published 22.12.2023

Введение

Интеллектуальные системы поддержки принятия врачебных решений (СППВР) доказали свою эффективность в анализе медицинских рисков, связанных с социально значимыми заболеваниями [1; 2; 3; 4; 5]. Были разработаны новые методы выявления эмпирических закономерностей, в результате чего была создана интеллектуальная система (ИС), содержащая базу данных предикторов риска (ПР), полученных на основе биоимпедансных исследований, включая биоимпедансную спектроскопию [6; 7; 8; 9].

Отличить рак поджелудочной железы (РПЖ) от хронического панкреатита (ХП) часто бывает сложно, особенно когда речь идет о небольших опухолях, что делает традиционные методы раннего выявления неэффективными. Через 10 лет после постановки диагноза ХП совокупный риск ПК составляет 2,6%, а через 25 лет возрастает до 12,2%, что подчеркивает ХП как заметный фактор риска ПК [10; 11; 12; 13]. Традиционно эндоскопическая ретроградная панкреатография (ЭРП) и функциональные тесты поджелудочной железы были золотыми стандартами диагностики ХП.

Однако эти тесты могут выявить отклонения только на поздних стадиях, что подчеркивает необходимость ранней диагностики ХП и оценки тяжести [12]. В исследовании [14] изучались изменения электрического импеданса у больных острым панкреатитом во время лечения. Исследовались изменения импеданса в анатомических областях, связанные с развитием панкреатита. Изменения импеданса происходят как при низких, так и при высоких частотах зондирующего тока, причем наиболее значительные изменения наблюдаются у больных острым деструктивным инфицированным панкреонекрозом. Эти изменения происходят из-за нарушений водно-электролитного баланса организма и структурных изменений внутри и снаружи клеток. После лечения показатели импеданса восстанавливаются к исходным значениям. В [10] исследователи проанализировали более 50 пациентов с острым панкреатитом на различных стадиях заболевания с помощью биоимпедансного анализа. Они устанавливают корреляции между биоимпедансом и клинической картиной острого панкреатита. У больных острым деструктивным инфицированным панкреонекрозом выявляются

значительные изменения биоимпеданса различной частоты, обусловленные электролитным дисбалансом в пораженных клетках. Стратегии лечения в первую очередь направлены на восстановление нормального объема циркулирующей крови для предотвращения аномальных концентраций электролитов, что в конечном итоге приближает значения биоимпеданса к норме.

Это исследование направлено на повышение точности и своевременности диагностики таких заболеваний, как рак поджелудочной железы. Эти подходы требуют раннего выявления и точной оценки для эффективного лечения, в то время как традиционные методы диагностики не отвечают этим требованиям. Объединив новейшие технологии, включая искусственный интеллект и биоимпедансную спектроскопию, мы стремимся разработать улучшенный подход к успешной диагностике и эффективному лечению.

В статье рассматривается метод классификации заболеваний поджелудочной железы на основе системы искусственного интеллекта с дескрипторами, рассчитанными по результатам биоимпедансной спектроскопии в экспериментах *in vivo*. Результаты были подтверждены на группах пациентов мужского и женского пола на разных стадиях рака в возрасте от 25 до 80 лет с использованием различных диагностических методов, включая сбор анамнеза, физикальное обследование, оценку сопутствующей патологии, лабораторные исследования, УЗИ, лапароскопию,

интраоперационную ревизию и компьютерную томографию. Это исследование открывает новые возможности для доступной и объективной диагностики заболеваний поджелудочной железы, расширяя возможности интеллектуальных систем принятия медицинских решений.

Материалы и методы

Формирование информативных признаков

Основой для построения набора данных послужил метод импедансной спектроскопии, описанный в [15; 16; 17]. В предлагаемом методе биоимпедансной спектроскопии анализируется биоимпеданс в четырех квазиортогональных отведениях. В каждом квазиортогональном отведении получаем амплитудно-фазочастотную характеристику (АФЧХ) импеданса биоматериала, часто называемую в литературе графиком Коула или импедансной диаграммой [18; 19; 20]. Для получения дескрипторов для обучаемого классификатора медицинского риска (МР) было использовано четыре квазиортогональных отведения. Расположение электродов для этих отведений показано на рисунке 1: электроды расположены во фронтальной плоскости (зеленый) и сагиттальной плоскости (красный). Первая пара электродов располагается на грудной клетке, а вторая пара – на брюшной полости. Такая конфигурация позволяет создавать четыре АФЧХ импеданса, в результате чего получается восемь векторов информативных признаков (по два на каждую диаграмму импеданса).

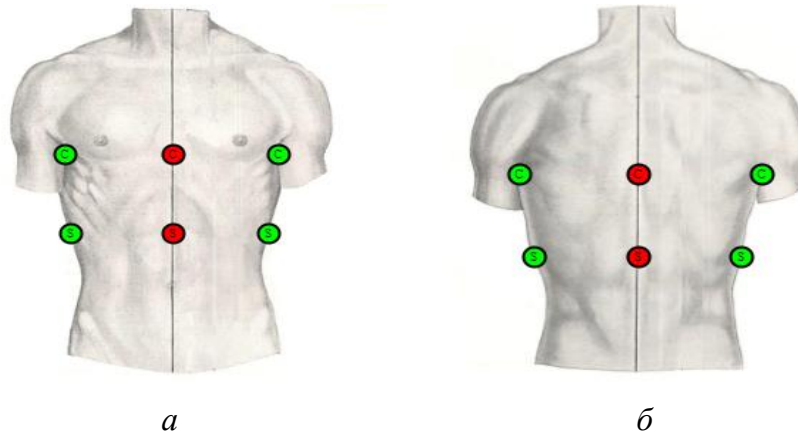


Рис. 1. Топология размещения электродов во время биоимпедансных исследований в четырех ортогональных отведениях в области грудной клетки и живота с указанием передней (а) и задней (б) сторон тела человека

Fig. 1. Topology of electrode placement during bioimpedance studies in four orthogonal leads in the chest and abdomen, indicating (a) the front and (б) back sides of the human body

На рисунке 2 представлен пример импедансной диаграммы, полученной в одном из отведений. После анализа АФЧХ, представленных в виде графиков $Re(m)$ и $Im(m)$, стало очевидно, что разделение диапазона амплитуд на шесть поддиапазонов (рис. 2) было логичным выбором. В этом контексте выгоднее выделять эти поддиапазоны по оси частот, устраняя необходимость нормализации значений $Re(m)$ и $Im(m)$. Следовательно, на частотной оси можем выделить

следующие диапазоны частот (в герцах): $df1:(0...10)$, $df2:(10...20)$, $df3:(20...30)$, $df4:(30...40)$, $df5:(40...60)$, $df6:(60...150)$. Внутри каждого поддиапазона, обозначенного номером g , мы рассчитали медианы $Re(medg)$ и $Im(medg)$, используя их как компоненты векторов дескрипторов, полученных на основе этого суррогатного маркера. Рассмотрим процесс формирования информативных векторов (рис. 2).

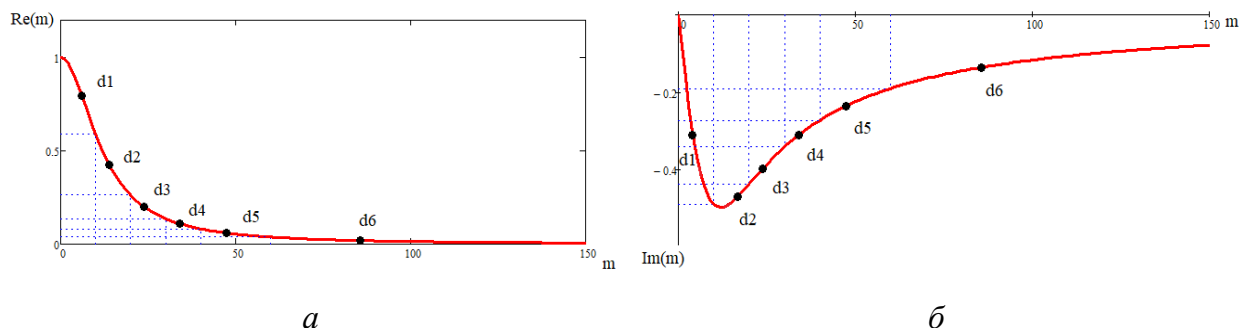


Рис. 2. Пример формирования вектора информативных признаков: а – по действительной части биоимпеданса; б – по мнимой части биоимпеданса

Fig. 2. An example of the formation of a vector of informative features: а – based on the real part of the bioimpedance; б – according to the imaginary part of the bioimpedance

Программно-аппаратные средства для биоимпедансных исследований поджелудочной железы

Для проведения биоимпедансных исследований использовалось устройство сбора данных (УСД), выполненное по аналогам, описанным в [21]. Согласование устройства биоимпедансной

спектроскопии с биообъектом обеспечивается посредством усилителей, включенных на выходе ЦАП и на входах АЦП УСД и находящихся в автономном модуле устройства связи с биообъектом (УСО). Его функциональная схема, рассчитанная на все ортогональные отведения (рис. 3).

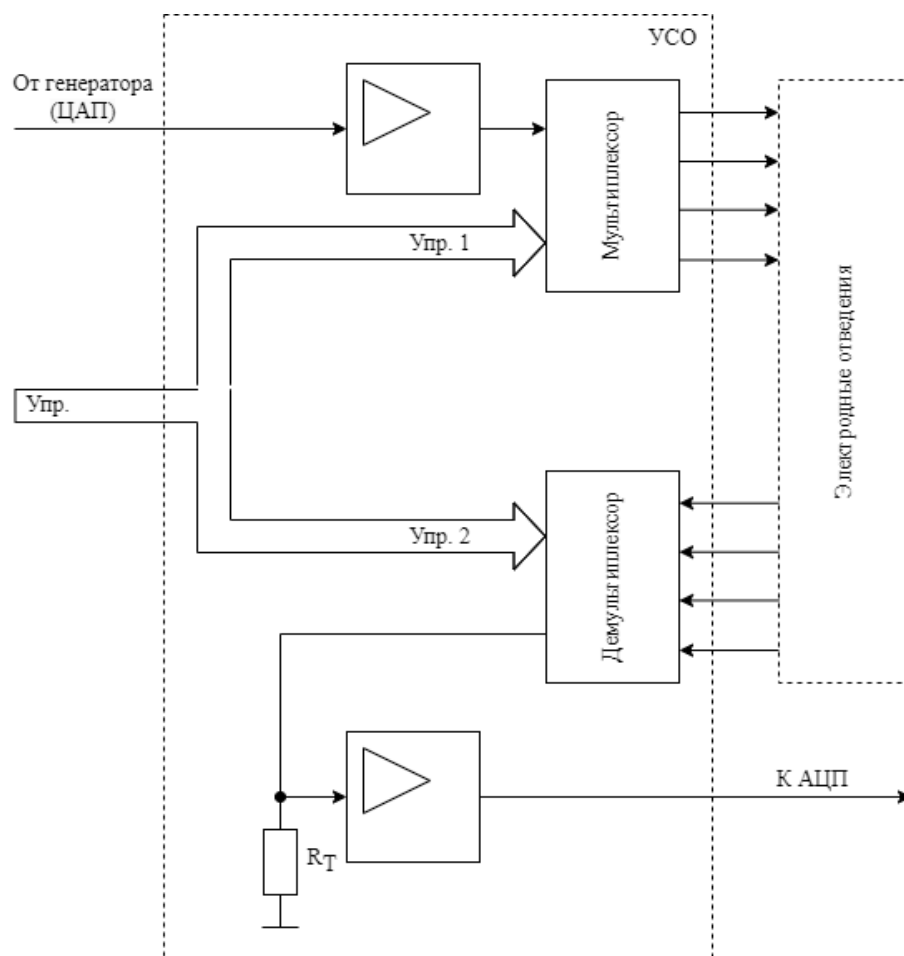


Рис. 3. Устройство связи с биообъектом

Fig. 3. Communication device with a biological object

Микроконтроллер УСД обеспечивает частоту зондирующего тока от нуля герц до 20 кГц и величину от 10 до 20 мкА в зависимости от конституционных особенностей пациента.

На рисунке 4 показаны результаты исследований биоимпеданса у группы

добровольцев мужского и женского пола на постоянном токе. Столбиковые диаграммы отражают средние по группе электрические сопротивления в отведениях в килоомах на постоянном токе при токе зондирования 10 мкА и токе зондирования 20 мкА. Отведения,

обозначенные на диаграммах цифрами 1 и 3, находятся в сагиттальной плоскости, а

отведения, обозначенные цифрами 2 и 4, – во фронтальной плоскости.

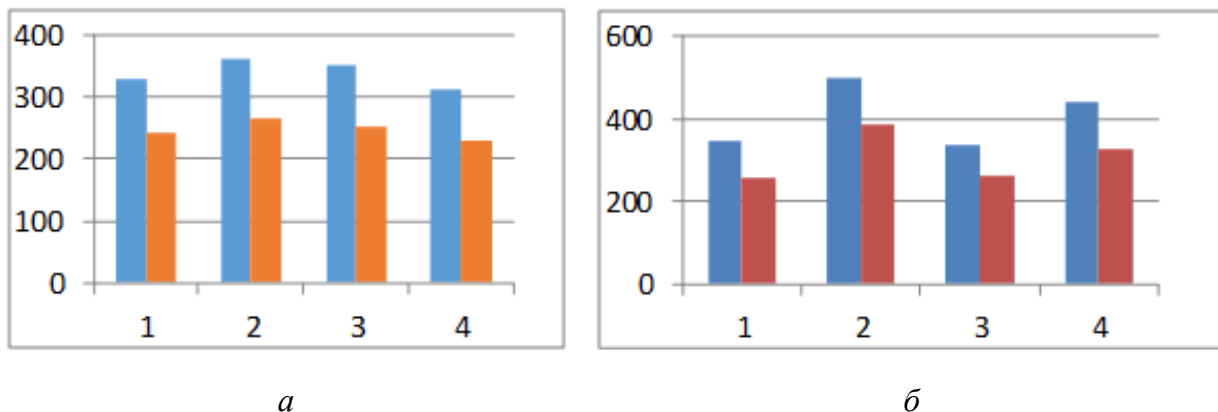


Рис. 4. Средние значения биоимпеданса в килоомах на постоянном токе в четырех ортогональных отведениях при токах зондирования 10 мкА (цвет голубой) и 20 мкА (цвет оранжевый) для мужчин (а) и для женщин (б)

Fig. 4. Average values of bioimpedance in kilo-ohms at direct current in four orthogonal leads at probing currents of 10 µA (blue) and 20 µA (orange) for men (a) and for women (b)

Программное обеспечение (ПО) для УСД включает ряд программных модулей, позволяющих вычислить биоимпеданс на различных частотах зондирующего тока. Для расчета ортогональных компонент биоимпеданса $\text{Re}Z$ и $\text{Im}Z$ используем метод вычисления, который предполагает использование двух АЦП, один из которых измеряет напряжение на биообъекте, а второй – на токовом

резисторе R , включенном последовательно с биообъектом в электрическую цепь [15; 21].

На рисунке 5 представлен упрощенный вариант измерительной цепи для предложенного метода. Величина резистора R подобран таким образом, чтобы он не оказал существенного влияния на ток в биообъекте.

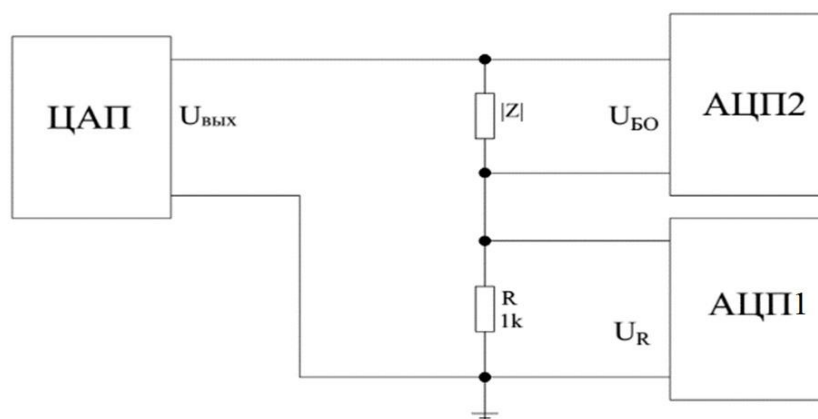


Рис. 5. Упрощенная схема измерения биоимпеданса

Fig. 5. Simplified scheme for measuring bioimpedance

Ток в резисторе R равен току в био-объекте

$$\vec{I}_R = \frac{\vec{U}_R}{R}. \quad (1)$$

На рисунке 6 показана векторная диаграмма токов и напряжений в электрической цепи (рис. 5).

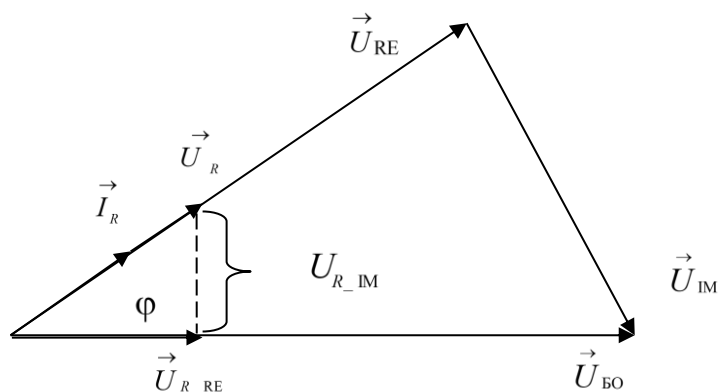


Рис. 6. Векторная диаграмма токов и напряжений в измерительной цепи

Fig. 6. Vector diagram of currents and voltages in the measuring circuit

Согласно рисунку 6, напряжение на выходе ЦАП $U_{\text{вых}}$ уравнивается двумя векторами $\vec{U}_{\text{RE}}$ и $\vec{U}_{\text{IM}}$. Для расчета реальной и мнимой составляющих биоимпеденса необходимо определить угол φ или проекцию вектора $\vec{U}_R$ на вектор $\vec{U}_{\text{вых}}$, который при достаточной

малости резистора R можем принять равным $\vec{U}_{\text{BO}}$. Для этого будем использовать квадратурный детектор, который состоит из двух синхронных детекторов (СД), у которых в качестве опорных напряжений используются квадратурные напряжения $\vec{U}_{\text{оп1}}$ и $\vec{U}_{\text{оп2}}$. Рассмотрим схему СД (рис. 7).

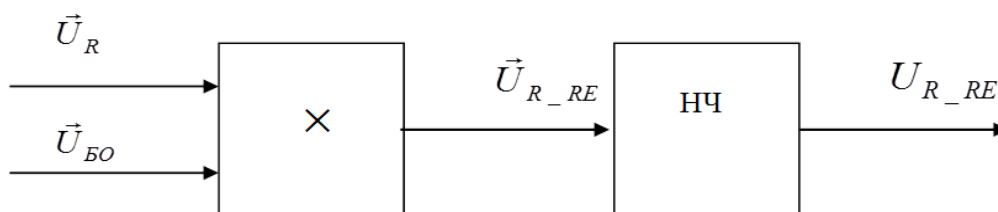


Рис. 7. Схема синхронного детектора

Fig. 7. Synchronous detector circuit

Учитывая, что $\vec{U}_{\text{BO}} = U_{\text{BO}} \sin \omega t$ и $\vec{U}_R = U_R \sin(\omega t + \varphi)$, и руководствуясь процедурами обработки сигнала (рис. 3), получим

$$\vec{U}_{R_RE} = \frac{1}{2} U_R U_{\text{оп1}} \times (\cos \varphi - \cos (2\omega t + \varphi)), \quad (2)$$

где $U_{\text{ОП1}} \sin(\omega t) = U_{\text{БО}} \sin(\omega t)$.

После низкочастотной фильтрации (НЧ) формула (2) примет вид

$$U_{R_RE} = \frac{1}{2} U_R U_{\text{ОП1}} (\cos \varphi). \quad (3)$$

Аналогично для мнимой составляющей

$$U_{R_IM} = \frac{1}{2} U_R U_{\text{ОП2}} (\sin \varphi). \quad (4)$$

Если СД реализован программно, то напряжения U_{R_RE} определяется по дискретным отсчетам $U_R[i]$ и $U_{\text{ОП1}}[i]$ также программно путем низкочастотной фильтрации

$$U_{R_RE}[i] = U_R[i] \cdot U_{\text{ОП1}}[i] \quad (5)$$

по формуле

$$U_{R_RE} = \frac{\sum_{i=1}^N U_{\text{АЦП1}}[i] \cdot U_{\text{ОП1}}[i]}{N}, \quad (6)$$

где $U_{\text{АЦП1}}[i]$ – отсчеты выходных напряжений АЦП, В; N – количество отсчетов зондирующего тока в окне анализа.

Аналогично для мнимой составляющей

$$U_{R_IM} = \frac{\sum_{i=1}^N U_{\text{АЦП1}}[i] \cdot U_{\text{ОП2}}[i]}{N}. \quad (7)$$

Угол φ находим по известным проекциям (рис. 6):

$$\varphi = \arctg \left(\frac{U_{R_IM}}{U_{R_RE}} \right). \quad (8)$$

Модуль комплексного сопротивления вычисляем как

$$|Z| = \frac{U_{\text{БО}}}{I_R}. \quad (9)$$

где $U_{\text{БО}}$ – амплитуда напряжения на выходе ЦАП (здесь мы пренебрегаем падением напряжения U_R).

Компоненты $\text{Re}Z$ и $\text{Im}Z$ биоимпеданса определяются путем проецирования комплексного вектора Z на оси квадратурных опорных напряжений.

На рисунке 8 показан алгоритм построения графика Коула [18]. В блоках 1 и 2 вводятся амплитуда напряжения на выходе ЦАП, диапазон частот исследования биоимпеданса и шаг изменения (приращения) частоты внутри диапазона частот. В блоке 3 по параметрам, введенным в блоках 1 и 2, вычисляются зависящие от них параметры зондирования – время измерения и частота дискретизации. На текущей частоте зондирования резервируется размер файла для приема данных с АЦП. В блоках 4–7 реализуется формирование зондирующих импульсов и прием сигналов ответной реакции. Блок 7 и блок 8 контролируют проход по заданному частотному диапазону.

Интерфейсные модули ПО УСД представлены ниже (рис. 9).

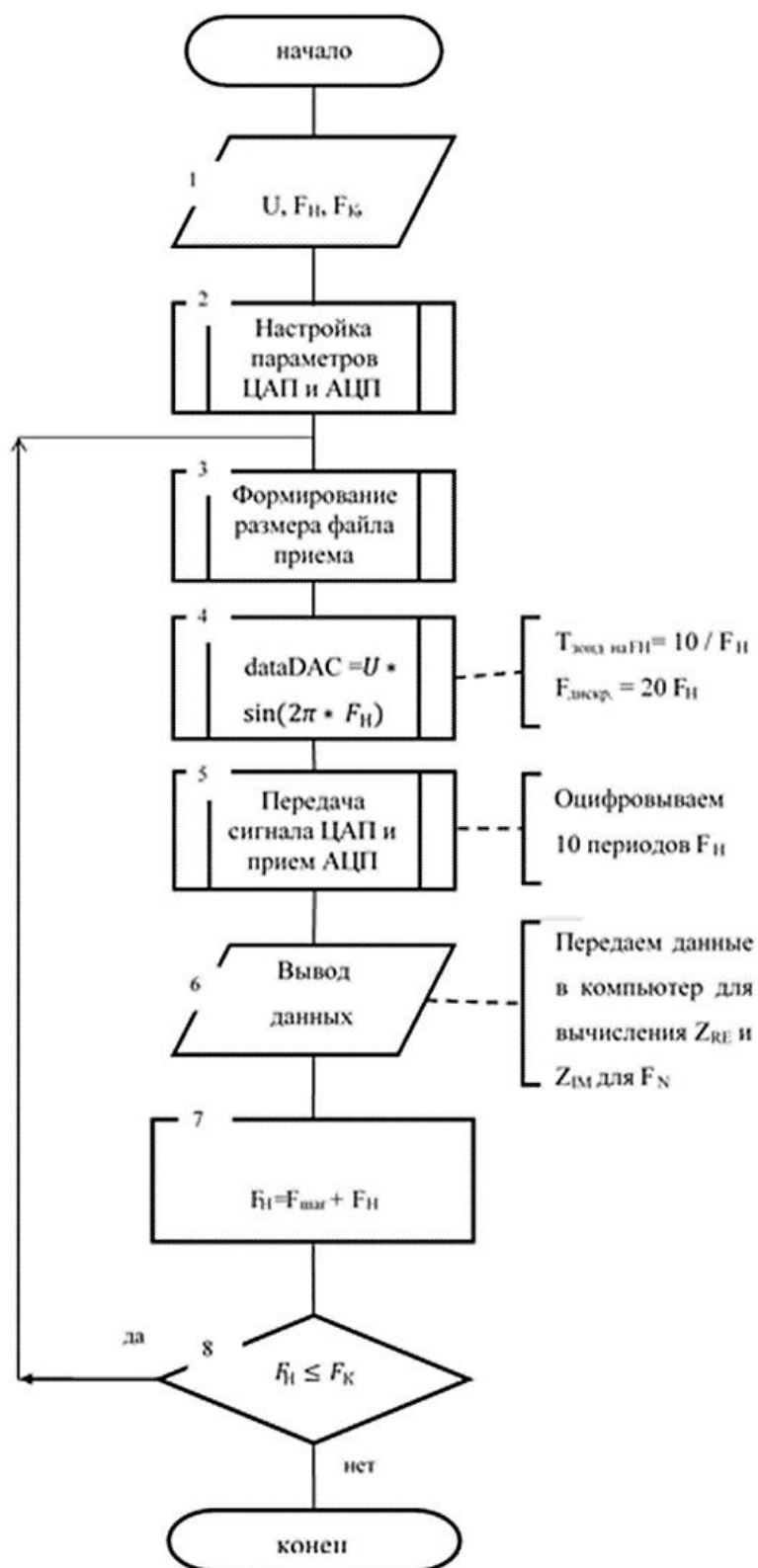
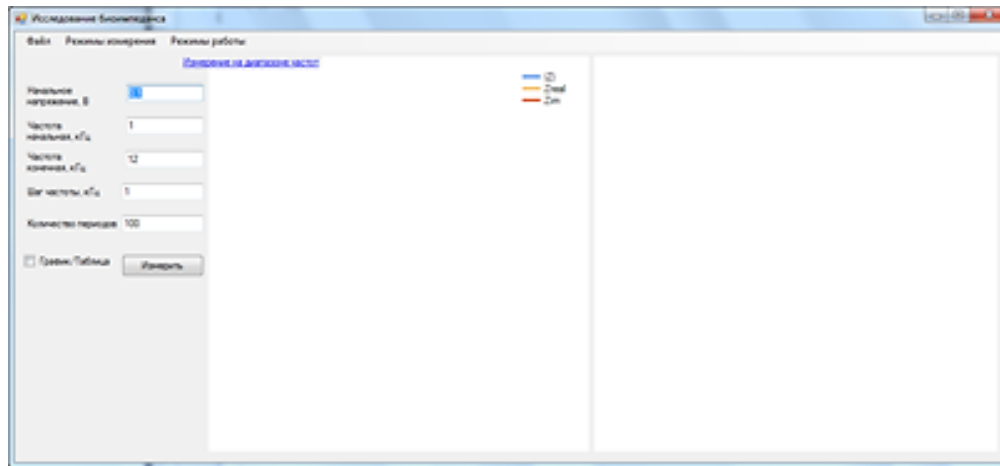
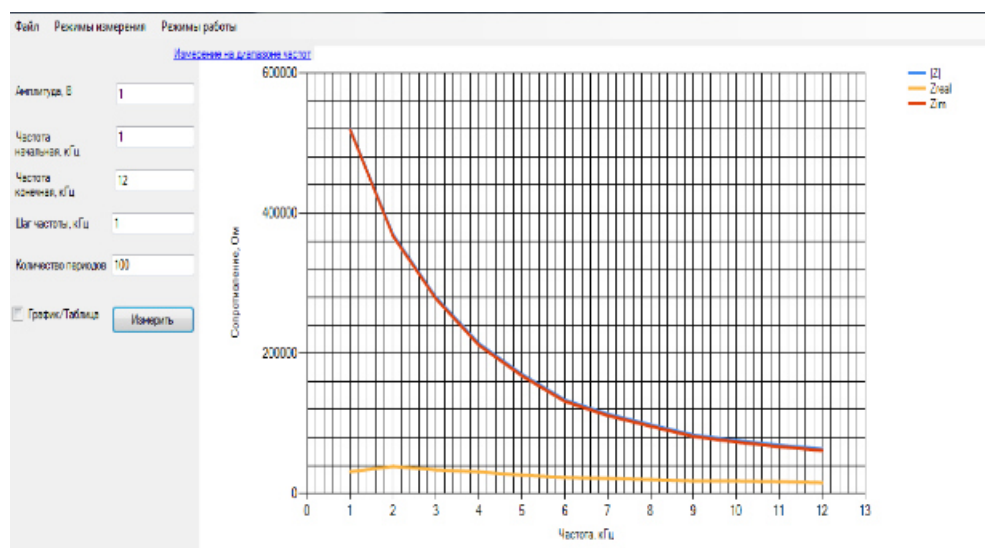


Рис. 8. Схема алгоритма получения сырых данных для одного ортогонального отведения

Fig. 8. Scheme of the algorithm for obtaining raw data for one orthogonal lead



а



б

Рис. 9. Интерфейсные окна устройства сбора данных: а – окно ввода исходных данных; б – окно отображения результатов [22]

Fig. 9. Interface windows of the data collection device: а – window for entering initial data; б – results display window [22]

Графики Коула сохраняются в компьютере и при необходимости могут быть отображаются в виде графиков.

Система искусственного интеллекта для классификации рисков заболеваний поджелудочной железы

Диагностика ПЖ включает комплекс исследований. Поэтому при проектировании СППВР используем

подход, изложенный в работе [23]. Согласно этому подходу, была предложена структура СППВР (рис. 10).

Ядром СППВР при диагностике и дифференциальной диагностике заболеваний ПЖ является гибридная нейронная сеть (ГНС), включающая четыре автономных интеллектуальных агента (АИА): NET1, NET2, NET3 и NET4, а также агрегатор – NET5.

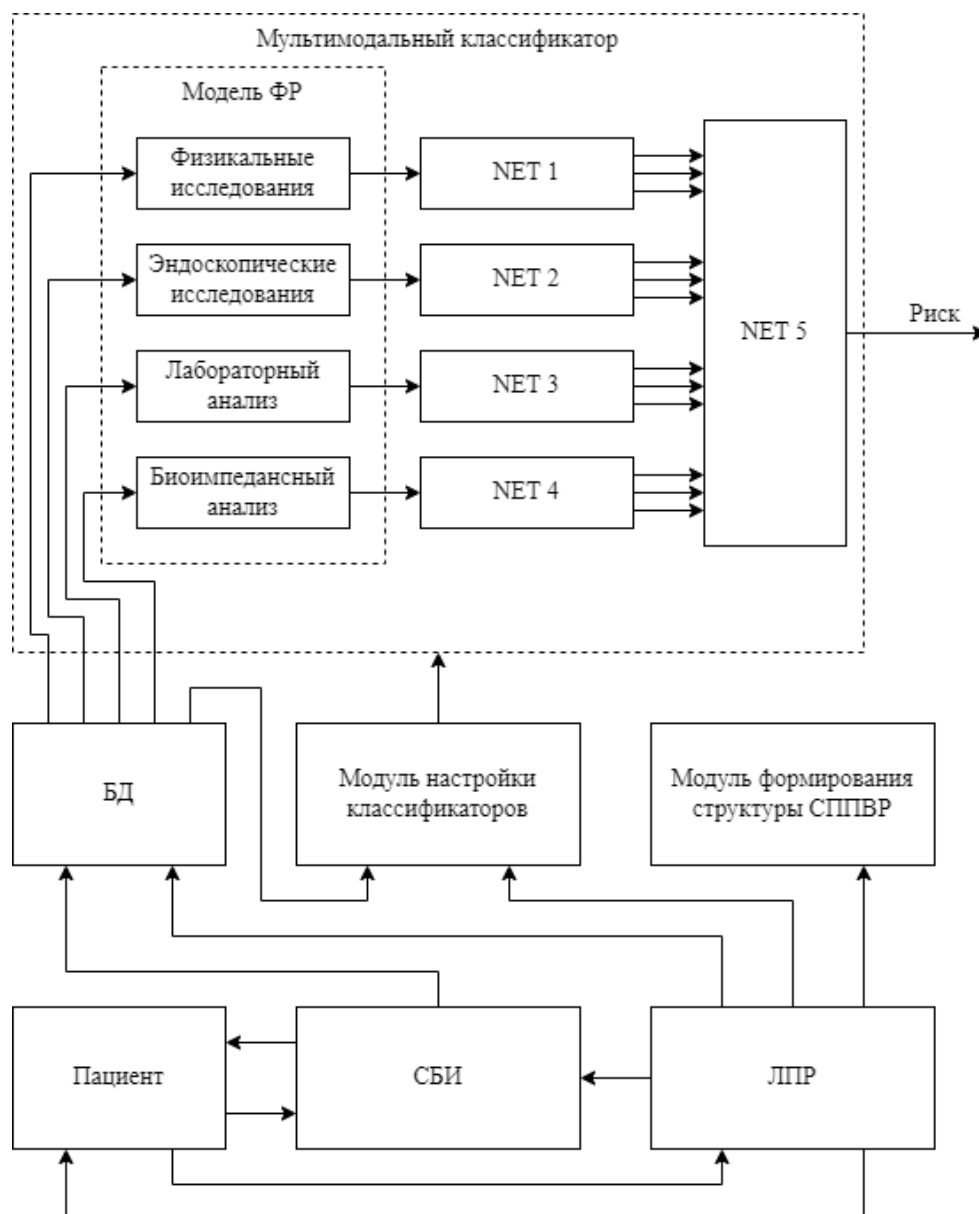


Рис. 10. Структурная схема системы интеллектуальной поддержки диагностики и дифференциальной диагностики заболеваний поджелудочной железы

Fig. 10. Block diagram of the system for intelligent support for diagnostics and differential diagnosis of pancreatic diseases

Модели ФР для этих АИА формируются на основе физикальных, УЗИ, лабораторных и биоимпедансных исследований. Сырые данные, а также дескрипторы хранятся в базе данных (БД). Настройка структуры СППВР и ее модулей осуществляется лицом, принимающим решение (ЛПР).

В модели риска заболеваний ПЖ были выделены четыре группы ФР. В первую группу ФР включены физикальные показатели, характерные для заболеваний ПЖ. Во второй группе ФР используются дескрипторы, полученные на основе методов УЗИ. Учитывая, что, как правило, для описания

функционального состояния пациента используют лингвистические переменные, для построения классификатора риска заболевания ПЖ в этом сегменте целесообразно использовать систему нечеткого логического вывода (СНЛВ). К

третьей группе ФР относятся показатели, получаемые по результатам лабораторного анализа. В таблице 1 приведены ФР, получаемые по биохимическому анализу крови.

Таблица 1. Факторы риска по показателям биохимического анализа крови [24]

Table 1. Risk factors according to biochemical analysis indicators [24]

Фактор риска	Результаты анализа	
	мужчины	женщины
1. Общий белок	64–84 г/л	64–84 г/л
2. Гемоглобин	130–160 г/л	120–150 г/л
3. Гаптоглобин	150–2000 мг/л	150–2000 мг/л
4. Глюкоза	3,30–5,50 ммоль/л	3,30–5,50 ммоль/л
5. Мочевина	2,5–8,3 ммоль/л	2,5–8,3 ммоль/л
6. Креатинин	62–115 мкмоль/л	53–97 мкмоль/л
7. Холестерин	3,5–6,5 ммоль/л	3,5–6,5 ммоль/л
8. Билирубин	5–20 мкмоль/л	5–20 мкмоль/л
9. АлАТ (АЛТ)	До 45 Ед/л	До 31 Ед/л
10. АсАТ (АСТ)	До 45 Ед/л	До 31 Ед/л
11. Липаза	0–190 Ед/л	0–190 Ед/л
12. Альфа-амилаза	28–100 Ед/л	28–100 Ед/л
13. Панкреатическая амилаза	0–50 Ед/л	0–50 Ед/л

В качестве четвертого сегмента ФР взяты дескрипторы, полученные на основе СБИ. Структурная схема гибридного классификатора (ГК) риска заболеваний ПЖ показана на рисунке 11. ГК включает два классификатора и один агрегатор. Для первого классификатора дескрипторы были получены по двухзвенным моделям Войта по трем

частотным отсчетам графика Коула. Второй классификатор построен по глобальной модели графика Коула [17; 18; 21].

Для дифференциальной диагностики заболеваний поджелудочной железы разработана гибридная нейронная сеть, структура которой показана на рисунке 12. Она позволяет отнести

неизвестный образец к трем альтернативным классам: рак ПЖ (РПЖ), хронический панкреатит (ХП) и класс без патологий ПЖ (БП). Первый слой – слой вероятностных нейронных сетей (PNN). На каждую группу пространства информативных признаков (ПИП) выделены

шесть блоков PNN. Если ПИП четыре, то всего в первом слое содержится 24 блока PNN. Математические операции, выполняемые в слое PNN, представлены в [25; 26]. Следующие макрослои, слои выполнены на основе нечеткого логического вывода (FNN).

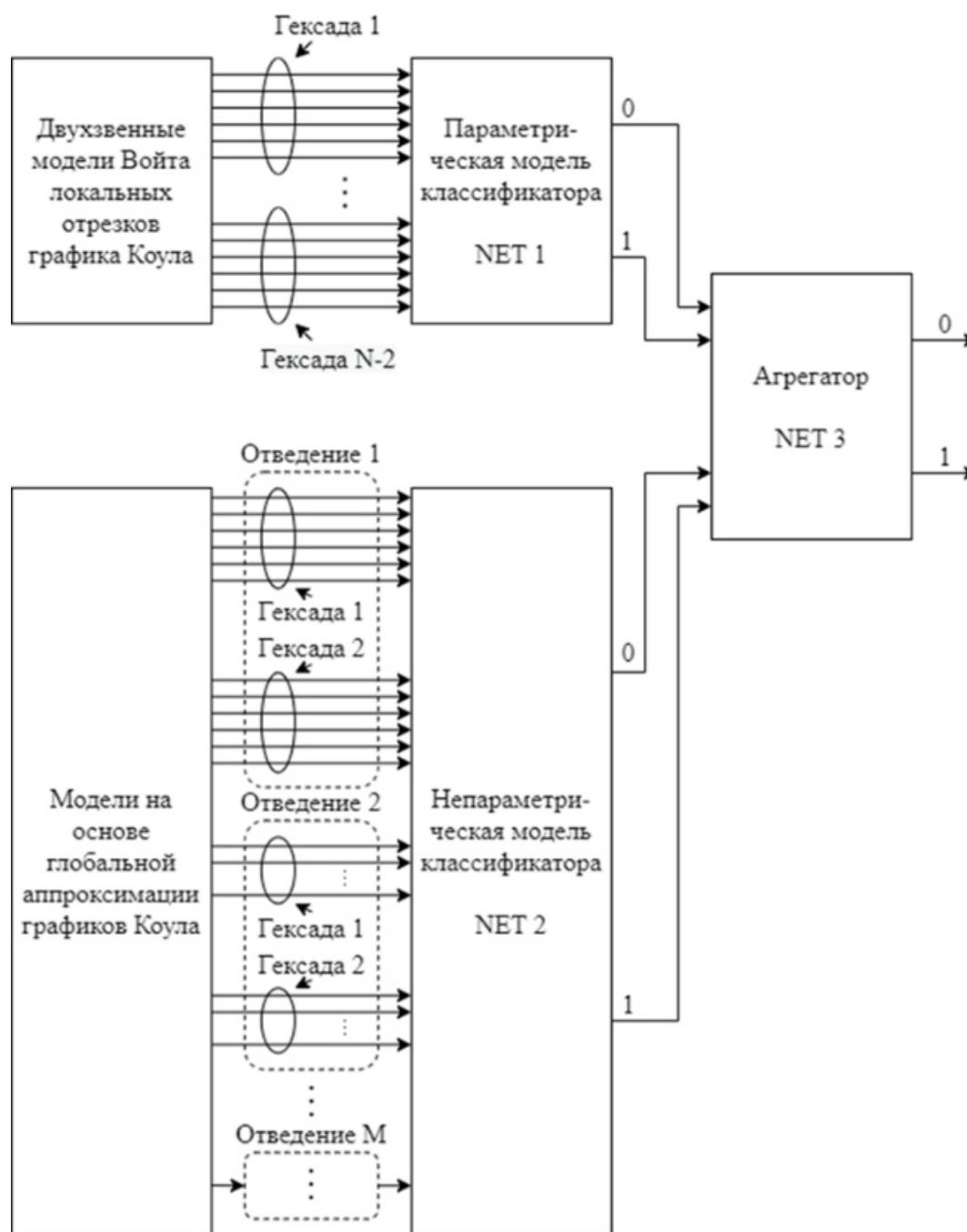


Рис. 11. Структура гибридного классификатора

Fig. 11. Hybrid classifier structure

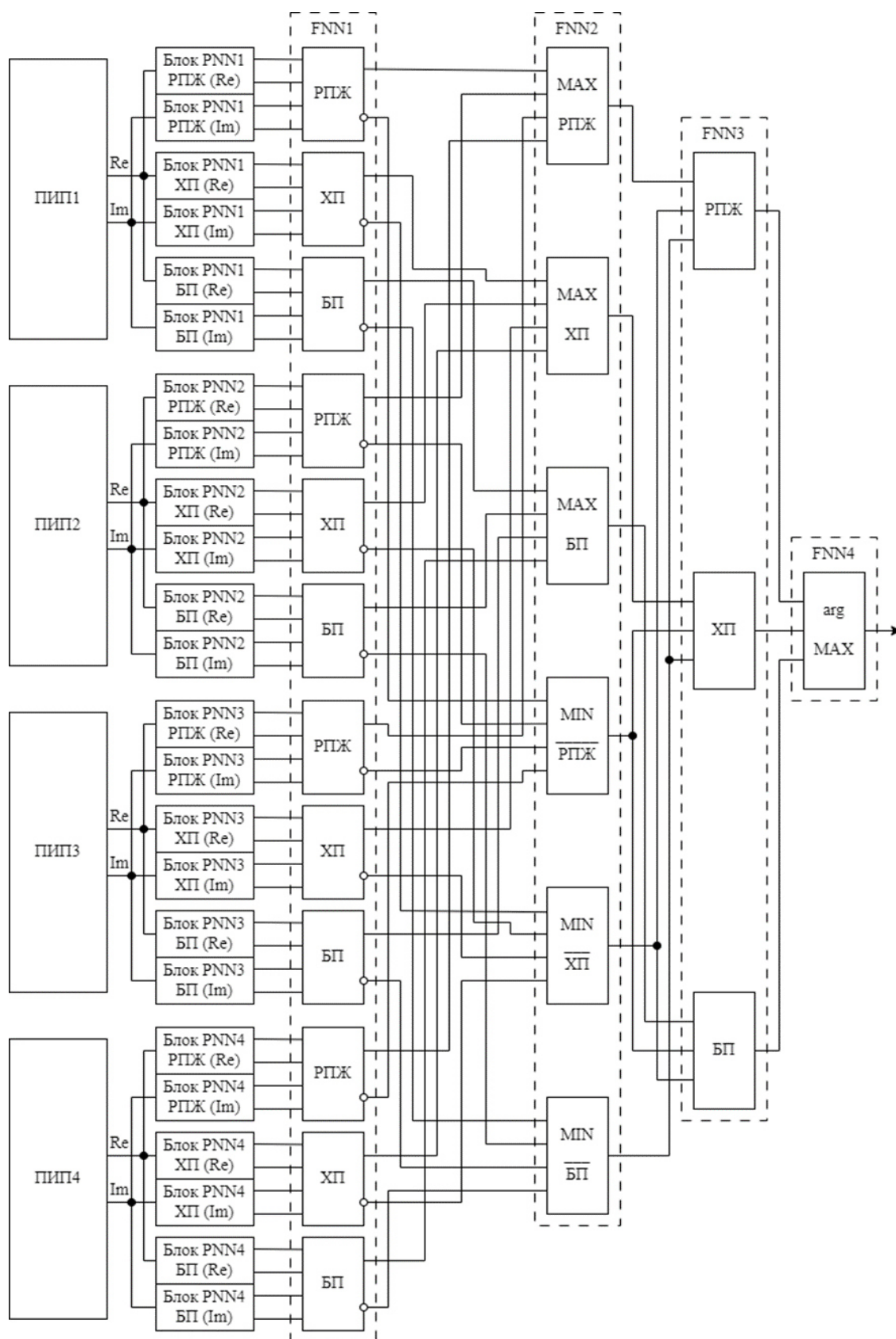


Рис. 12. Структурная схема гибридной нейронной сети с пятью макрослоями

Fig. 12. Block diagram of a hybrid neural network with five macrolayers

Второй макрослой состоит из двенадцати FNN. Каждая FNN имеет два нейронных слоя – четыре входных и два выходных нейрона. В нем выполняется операция

$$P_{\omega_i} = P_{\omega_i}(\operatorname{Re}(x)) + P_{\omega_i}(\operatorname{Im}(x))(1 - P_{\omega_i}(\operatorname{Re}(x))). \quad (10)$$

Третий макрослой осуществляет операции нечеткое «ИЛИ» и нечеткое «И» над выходами второго макрослоя. Четвертый макрослой определяет уверенности трех дифференцируемых классов с помощью S -нормы, которая для трехвходового нейрона этого макрослоя представлена уравнением

$$S_p(x, y, z) = x + y + z + xyz - xy - xz - yz, \quad (11)$$

где x, y, z – входы соответствующих нейронов слоя FNN3.

Пятый – класс-победитель, в нем выполняются следующие операции:

$$KY = \max(P_{\omega_1}, P_{\omega_2}, P_{\omega_3}), \quad (12)$$

$$\omega_\ell = \arg(\max(P_{\omega_1}, P_{\omega_2}, P_{\omega_3})). \quad (13)$$

Настройка структуры СППВР и ее модулей осуществляется ЛПР в интерактивном режиме. Для синтеза классификаторов МР, построенных на нечетких логических моделях, использовался алгоритм Мамдани-Заде, встроенный в модуль Fuzzy Матлаба [27]. Для этого был использован программный модуль *rusfis*, созданный на кафедре биомедицинской инженерии ЮЗГУ. Он позволяет в интерактивном режиме реализовать СНЛВ и имеет 6 основных интерфейсных окон, связанных посредством интерактивного режима. На рисунке 13 представлено интерфейсное окно, в котором изображены функции принадлежности входных и выходных переменных и результат, полученный СНЛВ, который интерпретируется так: уверенность риска ХП по терму «высокий» равна 0,776.

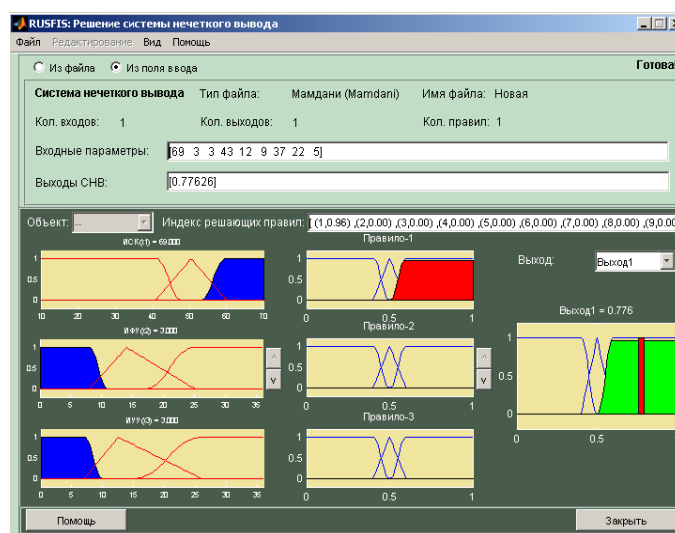
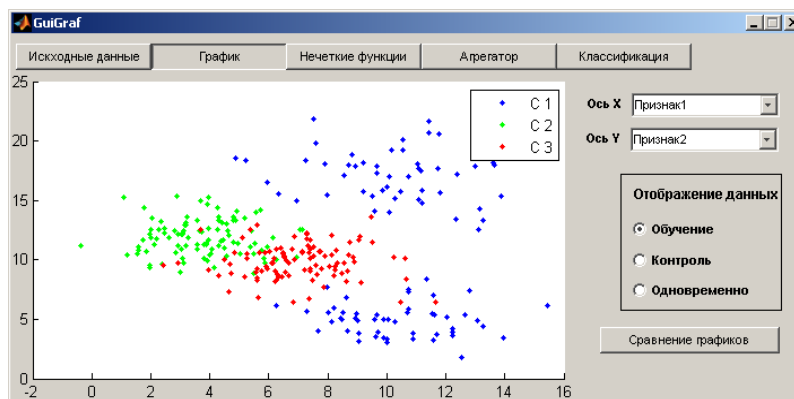


Рис. 13. Окно системы нечеткого вывода с введенными исходными данными и полученным результатом

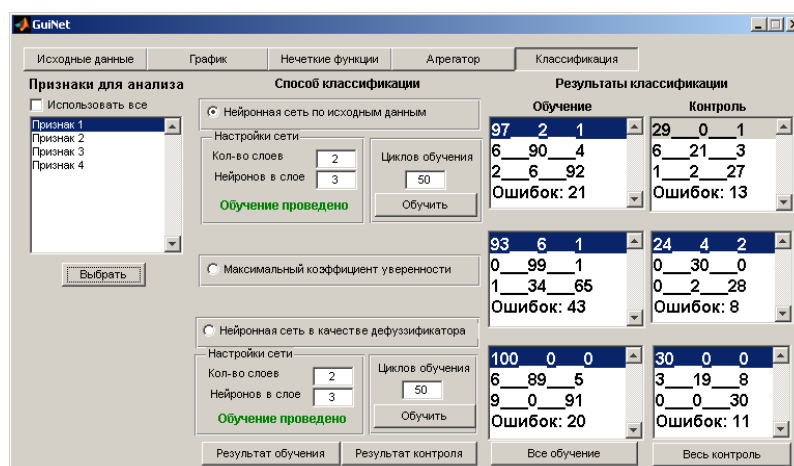
Fig. 13. Window of the fuzzy inference system with the entered initial data and the obtained result

Для реализации АИА на основе НС в среде Matlab 2018b был использован программный продукт *Neurowork* [27]. В отличие от модуля *rusfis*, который ориентирован только на синтез СНЛВ, этот модуль позволяет синтезировать нейронечеткие модели и на их основе осуществлять построение гибридных классификаторов. Программный продукт имеет пять вкладок: *GuiGraf*, *GuiData*, *GuiFuzzyFun*, *GuiAgreg*, *GuiNet*. Вкладка *GuiGraf* предназначена для графического анализа данных (рис. 14, а). В этой вкладке ЛПР имеет возможность наблюдать все возможные попарные сочетания комбинаций признаков для сравнительного анализа взаимного распределения

классов. Вкладка *GuiData* используется для ввода данных из базы данных или непосредственно от пациента. Вкладка *GuiFuzzyFun* – редактор функций принадлежности. Вкладка *GuiAgreg* позволяет синтезировать агрегаторы решающих правил. В этой вкладке ЛПР формирует меню нечетких операций, которые он включает в агрегатор [27]. Вкладка настройки и обучения многослойных НС прямого распространения *GuiNet* показана на рисунке 14, б, интерфейсное окно вкладки *GuiGraf* показано на рисунке 14, а. Используя ее ЛПР, может задать параметры НС и провести ее обучение и валидизацию.



а



б

Рис. 14. Интерфейсное окно вкладки *GuiGraf* (а) и интерфейсное окно вкладки *GuiNet* (б)

Fig. 14. Interface window of the *GuiGraf* (а) and interface window of the *GuiNet* (б)

Если гибридный классификатор построен и в качестве агрегатора используется нейронная сеть, то в окне вкладки *GuiData* вводится вектор дескрипторов неизвестного образца, а в окне вкладки *GuiNet* выводится величина медицинского риска к диагностируемому или дифференцируемому заболеванию.

Результаты и их обсуждение

Для апробации ГК было сформировано две экспериментальные группы. В первую группу было включено пятьдесят больных острым деструктивным панкреатитом (ОДП). Вторая группа состояла из здоровых добровольцев. Из этих двух групп формировались обучающая и контрольные выборки. При этом число добровольцев в контрольной группе подбиралось равным числу больных пациентов в этой же группе. Средний возраст пациентов и добровольцев в контрольных группах также был приблизительно одинаков. По результатам классификации примеров рассчитывались такие статистические показатели, как ДЧ, ДС и диагностическая эффективность (ДЭ).

Показатели качества были получены для двух моделей классификаторов, построенных на различных моделях биоимпеданса. В первом классификаторе с иерархической структурой в качестве модели биоимпеданса использовались модели Войта [17], а во втором – модифицированная модель Войта [21]. Число звеньев в моделях биоимпеданса определялось ошибкой аппроксимации экспериментальной импедансной диаграммы, теоретической импедансной диаграммой, построенной по импедансной модели Войта. На рисунке 15 представлены диаграммы, характеризующие показатели качества классификации этих моделей.

В качестве «золотого стандарта» использовались показатели УЗИ-диагностики на той же контрольной выборке. Показатели качества классификации построенных моделей классификаторов были сопоставимы с аналогичными показателями через кожной ультразвуковой диагностики.

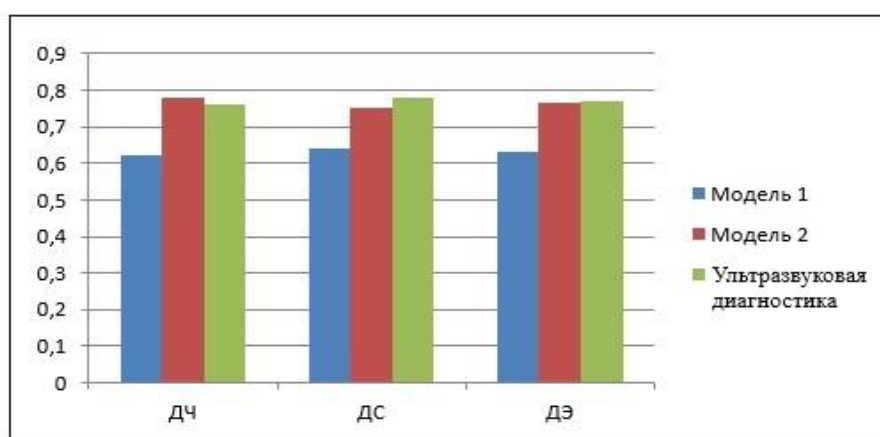


Рис. 15. Показатели качества диагностики острого деструктивного панкреатита для трех классификаторов

Fig. 15. Quality indicators for diagnosing acute destructive pancreatitis for three classifiers

Для апробации предложенных моделей классификаторов при дифференциальной диагностике заболеваний ПЖ было сформировано три экспериментальных группы: РПЖ – 40 пациентов, ХП – 35 пациентов, без патологии ПЖ (БП) – 30 добровольцев. Все пациенты и добровольцы были предупреждены об использовании их биометрических, персональных и медицинских данных для

публикации в научных журналах. В качестве классификатора использовалась гибридная нейронечеткая сеть со структурой (рис. 12), на вход которой подавались сырые данные, полученные с четырех отведений по методике (рис. 1).

В таблице 2 представлены результаты оценки показателей качества классификации.

Таблица 2. Показатели качеств дифференциальной диагностики по дифференцируемым классам

Table 2. Indicators of quality of differential diagnostics by differentiated classes

Распределение по классам в экспериментальных группах	Распределение по классам гибридной нейронной сетью		
	РПЖ	ХП	БП
$\omega_1 = 40$	29	11	0
$\omega_2 = 35$	8	22	5
$\omega_3 = 30$	0	2	28

На рисунке 16 представлена диаграмма показателей качества дифференциальной диагностики, полученная по экспериментальным данным, представ-

ленным в таблице 2. Результаты демонстрируют близкие значения к показателям качества ультразвуковой диагностики.

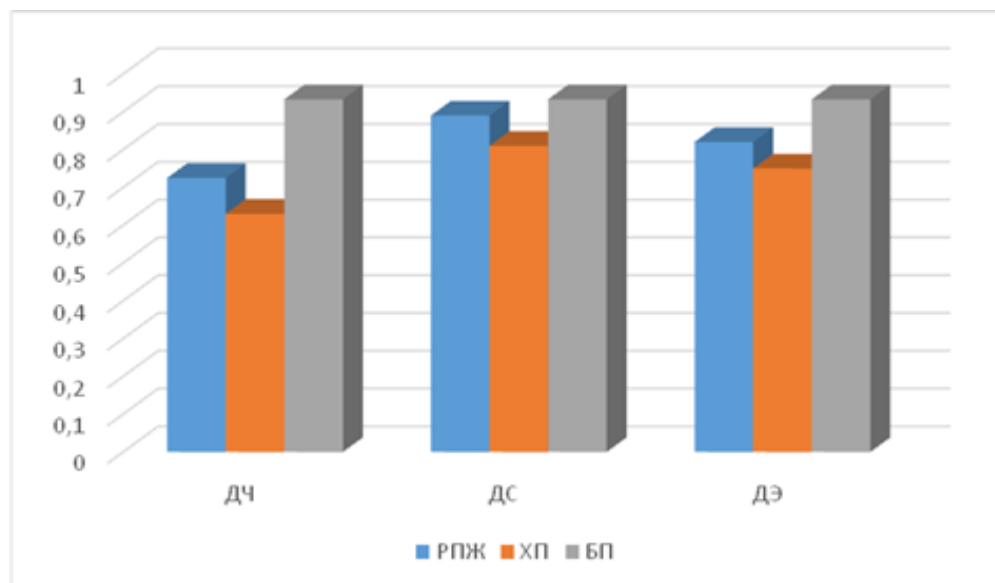


Рис. 16. Показатели качества дифференциальной диагностики заболеваний поджелудочной железы

Fig. 16. Quality indicators for differential diagnosis of pancreatic diseases

Выводы

1. Предложена методика биоимпедансной спектроскопии в четырех ортогональных отведениях.

2. Разработан программно-аппаратный комплекс биоимпедансной спектроскопии, позволяющий осуществлять биоимпедансные исследования в четырех ортогональных отведениях, в котором использовались автономные интеллектуальные агенты, работающие на парадигмах обучаемых нейронных сетей и нечеткого логического вывода. Для настройки полносвязных нейронных сетей и гибридных нейронных сетей использовалось программное обеспечение, разработанное в среде MATLAB.

3. Предложены структурно-функциональные решения гибридных моделей классификаторов, предназначенных для

интеллектуальной поддержки диагностики и дифференциальной диагностики заболеваний поджелудочной железы.

4. Проведен анализ ошибок первого и второго рода для классификаторов риска «острый деструктивный панкреатит», построенного по двум моделям биоимпеданса, который показал, что предложенные модели классификаторов продемонстрировали сопоставимые значения с показателями качества методов ультразвуковой диагностики.

5. Проведена оценка качества дифференциальной диагностики заболеваний поджелудочной железы посредством гибридной нейронной сети с пятью макрослоями по трем разделяемым классам, которая показала близкие значения к показателям качества методов ультразвуковой диагностики.

Список литературы

1. Biotechnical system based on fuzzy logic prediction for surgical risk classification using analysis of current-voltage characteristics of acupuncture points / S. Filist, R. T. Al-Kasasbeh, O. Shatalova, N. Korenevskiy, A. Shaqadan, Z. Protasova, M. Ilyash, M. Lukashov // *Journal of integrative medicine*. 2022. Vol. 20, N 3. P. 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.joim.2022.02.007>.
2. Hybrid neural networks with virtual flows in medical risk classifiers / K. Khatatneh, S. Filist, R. T. Al-Kasasbeh [et al.] // *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2022. Vol. 43, N 1. P. 1621–1632. <https://doi.org/10.3233/JIFS-212617>.
3. Classifier for the functional state of the respiratory system via descriptors determined by using multimodal technology / S. Filist, R. T. Al-Kasasbeh, O. Shatalova, A. Aikeyeva, O. M. O. Al-Hababbeh, M. Alshamasin, N. Korenevskiy, M. Khrisat, M. Myasnyankin, M. Ilyash // *Computer methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2022. Vol. 26, N 12. P. 1400–1418. <https://doi.org/10.1080/10255842.2022.2117551>.
4. Developing neural network model for predicting cardiac and cardiovascular health using bioelectrical signal processing / S. Filist, R. T. Al-Kasasbeh, O. Shatalova, A. Aikeyeva, N. Korenevskiy, A. Shaqadan, A. Trifonov, M. Ilyash // *Computer methods in biomechanics*

and biomedical engineering. 2021. Vol. 20, N 8. P. 908–921. <https://doi.org/0.1080/10255842.2021.1986486>.

5. Application of fuzzy neural network model and current-voltage analysis of biologically active points for prediction post-surgery risks / O. Shatalova, S. Filist, N. Korenevskiy, Z. Protasova, R. Taha Al-kasasbeh, A. Shaqadan, M. Ilyash, A. Rybochkin // Computer methods in biomechanics and biomedical engineering. 2021. Vol. 24, N 13. P. 1504–1516. <https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1895128>.

6. Miroshnikov A. V., Shatalova O. V., Zhilin V. V. Biomaterial impedance model for medical risk classifiers in in vivo experiments // Journal of Physics: Conference Series. 2021. N 1801. P. 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1801/1/012045>.

7. Formation of descriptors for medical risk classifiers based on the current-voltage characteristics of biologically active points / A. V. Miroshnikov, A. V. Kiselev, O. V. Shatalova, S. Kadyrova // Journal of Physics: Conference Series. 2021. N 2060. P. 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2060/1/012013>.

8. Iterative models of bioimpedance in intelligent systems for early diagnosis of infectious diseases / A. V. Miroshnikov, A. V. Kiselev, O. V. Shatalova, R. A. Krupchatnikov // CEUR Workshop Proceedings. 2021. N 2843. P. 35.

9. Параметрические модели биоимпеданса для идентификации функционального состояния живой системы / К. Д. А. Кассим, И. А. Ключиков, О. В. Шаталова, З. Д. Яа // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 50–56.

10. Булатов Р. Д. Применение интегральной двухчастотной импедансометрии в клиническом мониторинге у больных деструктивным панкреатитом // Анестезиология и реаниматология. 2012. № 3. С. 59–62.

11. Модели импеданса биоматериала для формирования дескрипторов в интеллектуальных системах диагностики инфекционных заболеваний / А. В. Мирошников, Н. С. Стадниченко, О. В. Шаталова, С. А. Филист // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8, № 4. С. 1–14. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.018>.

12. Usefulness of endoscopic ultrasound to diagnose the severity of chronic pancreatitis / I. Atsushi, K. Kyoko, O. Hiromasa, S. Ai, S. B. Manoop, V. H. Lyndon, K. Masaru // J. Gastroenterol. 2007. N 42. P. 90–94. <https://doi.org/10.1007/s00535-006-1916-9>.

13. Barsoukov E., Macdonald J. R. Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications. 2nd ed. New Jersey: Wiley Interscience Publication, 2005. 608 p. <https://doi.org/10.1002/0471716243>.

14. Bioelectric Impedance Analysis Test Improves the Detection of Prostate Cancer in Biopsy Candidates: A Multifeature Decision Support System / R. Bartoletti, A. Greco, T. Di Vico, J. Durante, V. Ficarra, E. P. Scilingo, G. Valenza // Frontiers in Oncology. 2021. N 11. P. 1–9. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.555277>.

15. Пат. 2504328 Российская Федерация. Устройство для контроля анизотропии электрической проводимости биотканей / Томакова Р. А., Филист С. А., Кузьмин А. А., Кузьмина М. Н., Алексеенко В. А., Волков И. И. № 2012128471/14; заявл. 06.07.12; опубл. 20.01.14.

16. Prediction models for diagnosis and prognosis of covid-19 infection: systematic review and critical appraisal / L. Wynants, B. V. Calster, G. S. Collins [et al.] // *BMJ*. 2020. N 369. P. m1328. <https://doi.org/10.1136/bmj.m1328>.

17. Классификации биологических объектов на основе многомерного биоимпедансного анализа / А. В. Мирошников, О. В. Шаталова, Н. С. Стадниченко, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 29–49.

18. Алгоритм оптимизации модели Войта в классификаторах функционального состояния живых систем / А. В. Мирошников, О. В. Шаталова, М. А. Ефремов, Н. С. Стадниченко, А. Ю. Новоселов, А. В. Павленко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 2. С. 59–75. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-59-75>.

19. Филист С. А., Кузьмин А. А., Кузьмина М. Н. Биотехническая система для контроля импеданса биоматериалов в экспериментах *in vivo* // Биомедицинская радиоэлектроника. 2014. № 9. С. 38–42.

20. Шаталова О. В. Итерационная многопараметрическая модель биоимпеданса в экспериментах *in vivo* // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 1. С. 26–38.

21. Развитие технологии биоимпедансной спектроскопии в системах поддержки принятия врачебных решений / О. В. Шаталова, Н. С. Стадниченко, М. А. Ефремов, А. Ю. Новоселов, И. А. Башмакова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 1. С. 143–169. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-143-169>.

22. Шаталова О. В. Интеллектуальные системы мониторинга медицинских рисков с учетом биоимпедансных исследований: монография / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2020. 356 с.

23. Формирование дескрипторов для классификаторов функционального состояния системы дыхания на основе спектрального анализа электрокардиосигнала / М. Б. Мяснянкин, С. А. Филист, А. В. Киселев, А. А. Кузьмин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 8–28.

24. Хронический панкреатит // Клиника высоких медицинских технологий им. Н. И. Пирогова. URL: <https://www.gosmed.ru/lechebnaya-deyatelnost/spravochnik-zabolevaniy/gastroenterologiya-bolezny/khronicheskiy-pankreatit/> (дата обращения: 10.09.2023).

25. Филист С. А., Шаталова О. В., Ефремов М. А. Гибридная нейронная сеть с макро- и мезослоями для медицинских приложений // Нейрокомпьютеры. Разработка и применение. 2014. № 6. С. 35–39.

26. Использование гибридных нейросетевых моделей для многоагентных систем классификации в гетерогенном пространстве информативных признаков / А. Г. Курочкин, В. В. Жилин, С. Е. Суржикова, С. А. Филист // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2015. Т. 3, № 31. С. 85–95.

27. Серебровский В. В., Филист С. А., Шаталова О. В. Нечеткое моделирование сложных систем в среде MATLAB и fuzzyTECH: монография. Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова, 2013. 105 с.

References

1. Filist S., Al-Kasasbeh R.T., Shatalova O., Korenevskiy N., Shaqadan A., Protasova Z., Ilyash M., Lukashov M. Biotechnical system based on fuzzy logic prediction for surgical risk classification using analysis of current–voltage characteristics of acupuncture points. *Journal of Integrative Medicine*, 2022, vol. 20, no. 3, pp. 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.joim.2022.02.007>

2. Khatatneh K., Filist S., Al-Kasasbeh R. T., eds. Hybrid neural networks with virtual flows in medical risk classifiers. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2022, vol. 43, no. 1, pp. 1621–1632. <https://doi.org/10.3233/JIFS-212617>

3. Filist S., Al-Kasasbeh R. T., Shatalova O., Aikeyeva A., Al-Hababbeh O. M. O., Alshamasin M., Korenevskiy N., Khraisat M., Myasnyankin M., Ilyash M. Classifier for the functional state of the respiratory system via descriptors determined by using multimodal technology. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2022, vol. 26, no. 12, pp. 1400–1418. <https://doi.org/10.1080/10255842.2022.2117551>

4. Filist S., Al-Kasasbeh R. T., Shatalova O., Aikeyeva A., Korenevskiy N., Shaqadan A., Trifonov A., Ilyash M. Developing neural network model for predicting cardiac and cardiovascular health using bioelectrical signal processing. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2021, vol. 20, no. 8, pp. 908–921. <https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1986486>

5. Shatalova O., Filist S., Korenevskiy N., Protasova Z., Taha Al-kasasbeh R., Shaqadan A., Ilyash M., Rybochkin A. Application of fuzzy neural network model and current-voltage analysis of biologically active points for prediction post-surgery risks. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2021, vol. 24, no. 13, pp. 1504–1516. <https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1895128>

6. Miroshnikov A. V., Shatalova O. V., Zhilin V. V. Biomaterial impedance model for medical risk classifiers in in vivo experiments. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 1801, pp. 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1801/1/012045>
7. Miroshnikov A. V., Kiselev A. V., Shatalova O. V., Kadyrova S. Formation of descriptors for medical risk classifiers based on the current-voltage characteristics of biologically active points. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 2060, pp. 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2060/1/012013>
8. Miroshnikov A. V., Kiselev A. V., Shatalova O. V., Krupchatnikov R. A. Iterative models of bioimpedance in intelligent systems for early diagnosis of infectious diseases. *CEUR Workshop Proceedings*, 2021, no. 2843, p. 35.
9. Kassim K. D. A., Klyuchikov I. A., Shatalova O. V., Yaa Z. D. Parametricheskiye modeli bioimpedansa dlya identifikatsii funktsional'nogo sostoyaniya zhivoy sistemy [Parametric bioimpedance models for identifying the functional state of a living system]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2012, no. 4, pp. 50–56.
10. Bulatov R. D. Primeneniye integral'noy dvukhchastotnoy impedansometrii v klinicheskoy monitoringe u bol'nykh destruktivnym pankreatitom [The use of integral two-frequency impedance metrology in clinical monitoring in patients with destructive pancreatitis]. *Anesteziologiya i reanimatologiya = Anesthesiology and Resuscitation*, 2012, no. 3, pp. 59–62.
11. Miroshnikov A. V., Stadnichenko N. S., Shatalova O. V., Filist S. A. Modeli impedansa biomateriala dlya formirovaniya deskriptorov v intellektual'nykh sistemakh diagnostiki infektsionnykh zabolevaniy [Biomaterial impedance models for the formation of descriptors in intelligent systems for the diagnosis of infectious diseases]. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technologies*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 1–14. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.018>
12. Atsushi I., Kyoko K., Hiromasa O., Ai S., Manoop S. B., Lyndon V. H., Masaru K. Usefulness of endoscopic ultrasound to diagnose the severity of chronic pancreatitis. *J. Gastroenterol*, 2007, no. 42, pp. 90–94. <https://doi.org/10.1007/s00535-006-1916-9>
13. Barsoukov E., Macdonald J. R. Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications. 2nd ed. New Jersey, Wiley Interscience Publication, 2005. <https://doi.org/10.1002/0471716243>
14. Bartoletti R., Greco A., Di Vico T., Durante J., Ficarra V., Scilingo E. P., Valenza G. Bioelectric Impedance Analysis Test Improves the Detection of Prostate Cancer in Biopsy Candidates: A Multifeature Decision Support System. *Frontiers in Oncology*, 2021, N 11, pp. 1–9. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.555277>
15. Tomakova R. A., Filist S. A., Kuz'min A. A., Kuz'mina M. N., Aleksenko V. A., Volkov I. I. Ustroystvo dlya kontrolya anizotropii elektricheskoy provodimosti biotkaney [Device for controlling the anisotropy of electrical conductivity of biotissues]. Patent RF, no. 2504328, 2014.

16. Wynants L., Calster B. V., Collins G. S., eds. Prediction models for diagnosis and prognosis of COVID-19 infection: systematic review and critical appraisal. *BMJ*, 2020, no. 369, pp. m1328. <https://doi.org/10.1136/bmj.m1328>
17. Miroshnikov A. V., Shatalova O. V., Stadnichenko N. S., Shulga L. V. Klassifikatsiya biologicheskikh ob"yektov na osnove mnogomernogo bioimpedansnogo analiza [Classification of biological objects based on multidimensional bioimpedance analysis]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2020, vol. 10, no. 3/4, pp. 29–49.
18. Miroshnikov A. V., Shatalova O. V., Efremov M. A., Stadnichenko N. S., Novoselov A. Yu., Pavlenko A. V. Algoritm optimizatsii modeli Voyta v klassifikatorakh funktsional'nogo sostoyaniya zhivykh system [Method for Classification of the Functional State of Living Systems Based on Recurrent Voigt Models]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of Southwest State University. Series Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 59–75. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-59-75>
19. Filist S. A., Kuzmin A. A., Kuzmina M. N. Biotekhnicheskaya sistema dlya kontrolya impedansa biomaterialov v eksperimentakh in vivo [Biotechnical system for controlling the impedance of biomaterials in in vivo experiments]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2014, no. 9, pp. 38–42.
20. Shatalova O. V. Iteratsionnaya mnogoparametricheskaya model' bioimpedansa v eksperimentakh in vivo [Iterative multiparameter bioimpedance model in in vivo experiments]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 26–38.
21. Shatalova O. V., Stadnichenko N. S., Yefremov M. A., Novoselov A. Yu., Bashmakova I. A. Razvitiye tekhnologiy bioimpedansnoy spektroskopii v meditsinskoй podderzhke prinyatiya meditsinskikh resheniy [Development of Bioimpedance Spectroscopy Technology in Medical Decision Support Systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 143–169. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-1-143-169>
22. Shatalova O. V. Intellektual'nyye sistemy meditsinskogo riska s uchetom bioimpedansnykh issledovaniy [Intelligent systems for monitoring medical risks taking into account bioimpedance studies]. Kursk, Southwest State University Publ., 2020. 356 p.

23. Myasnyankin M. B., Filist S. A., Kiselev A. V., Kuz'min A. A. Formirovaniye deskriptorov dlya klassifikatorov funktsional'nogo sostoyaniya sistem dykhaniya na osnove spektral'nogo analiza elektrokardiosignala [Formation of descriptors for classifiers of the functional state of respiratory systems based on spectral analysis of the electrocardiosignal]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2020, vol. 10, no. 3/4, pp. 8–28.

24. Khronicheskiy pankreatit [Chronic pancreatitis]. Klinika vysokikh meditsinskikh tekhnologiy imeni N. I. Pirogova [Clinic of High Medical Technologies named after N. I. Pirogov]. Available at: <https://www.gosmed.ru/lechebnaya-deyatelnost/spravochnik-zabolevaniy/gastroenterologiya-bolezny/khronicheskiy-pankreatit/>. (accessed 10.09.2023)

25. Filist S. A., Shatalova O. V., Efremov M. A. Gibriddnaya neyronnaya set' s makrosloyami dlya meditsinskikh prilozheniy [Hybrid neural network with macro layers for medical applications]. *Neyrokomp'yutery. Razrabotka i primeneniye = Neurocomputers. Development and Application*, 2014, no. 6, pp. 35–39.

26. Kurochkin A. G., Zhilin V. V., Surzhikova S. E., Filist S. A. Ispol'zovaniye gibridnykh neyrosetevykh modeley dlya mnogoagentnykh sistem klassifikatsii v geterogennom prostranstve informativnykh priznakov [Using hybrid neural network models for multi-agent classification systems in a heterogeneous space of informative features]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technology*, 2015, vol. 3, no. 31, pp. 85–95.

27. Serebrovskiy V. V., Filist S. A., Shatalova O. V. Nechetkoye modelirovaniye slozhnykh sistem v srede MATLAB i fuzzyTECH [Fuzzy modeling of complex systems in MATLAB and fuzzyTECH]. Kursk, Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov Publ., 2013. 105 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Шаталова Ольга Владимировна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: shatolg@mail.ru, Researcher ID: C-3687-2015, ORCID: 0000-0002-0901-9272

Olga V. Shatalova, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: shatolg@mail.ru, Researcher ID: C-3687-2015, ORCID: 0000-0002-0901-9272

Стадниченко Никита Сергеевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Nikita S. Stadnichenko, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Ефремов Михаил Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ib-swsu@yandex.ru

Mikhail A. Efremov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Security, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ib-swsu@yandex.ru

Башмакова Ирина Алексеевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электроснабжения, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Irina92_2010@mail.ru, ORCID: 0009-0001-1402-7349

Irina A. Bashmakova, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Lecturer of the Department of Electricity Supply, Southwest State University, Kursk, Russia Federation, e-mail: Irina92_2010@mail.ru, ORCID: 0009-0001-1402-7349

Лях Антон Викторович, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Anton V. Lyakh, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Серебровский Андрей Вадимович, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Andrey V. Serebrovsky, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-175-192>



УДК 004.891

Метод оценки уровня неспецифической защиты организма человека по показателям, характеризующим процессы адаптации

С. Н. Родионова¹ ✉

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

✉ e-mail: knsofia@mail.ru

Резюме

Целью исследования является разработка метода оценки уровня неспецифической защиты организма человека по показателям, характеризующим процессы адаптации, использование которого в решающих правилах прогнозирования и диагностики заболеваний обеспечивает повышение качества принимаемых решений.

Методы. В многочисленных источниках имеется достаточно подробное описание защитных механизмов организма человека, реализуемых неспецифической и специфической системами защиты, которые тесно связаны с такими понятиями, как: адаптационный потенциал, адаптационный резерв, функциональное состояние и функциональный резерв.

В работе исследуются вопросы использования показателей, характеризующих адаптационный потенциал и адаптационные резервы для количественной оценки неспецифического уровня защиты организма от воздействия разнородных внешних факторов. В качестве базового математического аппарата используется методология синтеза гибридных нечетких решающих правил.

Результаты. В работе показано, что для количественной оценки уровня защиты организма целесообразно использовать показатель активности регуляторных систем, адаптационный потенциал, показатель, характеризующий иммунно-эндокринную составляющую адаптации, и показатель, характеризующий нервно-психическую составляющую адаптации. Для этой системы показателей разработан метод оценки уровня защиты по базовым показателям, характеризующим процессы адаптации на общесистемном уровне, отличающийся учетом составляющих, характеризующих различные механизмы формирования адаптационного потенциала и адаптационного резерва, учитывающий специфику структуры данных и способы их обработки для наилучших результатов по качеству и времени принимаемых решений. Получены нечеткие функции уровня защиты по выбранной системе показателей с интегральной оценкой уровня защиты организма.

© Родионова С. Н., 2023

Заключение. В работе показано, что для улучшения показателей качества прогнозирования и диагностики социально значимых и профессиональных заболеваний целесообразно использовать показатели уровня защиты организма, определяемые по адаптационным механизмам. Установлено, что качество принятия решений с использованием предложенных моделей увеличивается на 10–15% в зависимости от типа решаемых задач по сравнению с моделями, не использующими показатели уровня защиты организма.

Ключевые слова: адаптационный потенциал; адаптационный резерв, функции уровня защиты; уровень защиты организма; нечеткие решающие правила.

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет – 2030».

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

Для цитирования: Родионова С. Н. Метод оценки уровня неспецифической защиты организма человека по показателям, характеризующим процессы адаптации // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 4. С. 175–192. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-175-192>.

Поступила в редакцию 04.10.2023

Подписана в печать 03.11.2023

Опубликована 22.12.2023

A Method for Assessing the Level of Nonspecific Protection of the Human Body by Indicators Characterizing the Processes of Adaptation

Sofia N. Rodionova¹✉

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

✉ e-mail: knsofia@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop a method for assessing the level of nonspecific protection of the human body according to indicators characterizing the adaptation processes, the use of which in the decisive rules of forecasting and diagnosis of diseases ensures an improvement in the quality of decisions made.

Methods. Numerous sources have a fairly detailed description of the protective mechanisms of the human body, implemented by non-specific and specific protection systems, which are closely related to such concepts as: adaptive potential, adaptive reserve, functional state and functional reserve.

The paper investigates the use of indicators characterizing the adaptive potential and adaptive reserves for quantifying the nonspecific level of protection of the body from the effects of heterogeneous external factors. The methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules is used as a basic mathematical apparatus.

Results. The paper shows that to quantify the level of protection of the body, it is advisable to use an indicator of the activity of regulatory systems, adaptive potential, an indicator characterizing the immune-endocrine component of adaptation and an indicator characterizing the neuropsychic component of adaptation. For this system of indicators, a method has been developed to assess the level of protection based on basic indicators characterizing adaptation processes at the system-wide level, characterized by taking into account components characterizing various mechanisms for the formation of adaptive potential and adaptive reserve, taking into account the specifics of the data structure and

ways of processing them for the best results in terms of quality and time of decisions. Fuzzy functions of the level of protection according to the selected system of indicators with an integral assessment of the level of protection of the body are obtained.

Conclusion. The paper shows that in order to improve the quality of forecasting and diagnosis of socially significant and occupational diseases, it is advisable to use indicators of the level of protection of the body determined by adaptive mechanisms. It is established that the quality of decision-making using the proposed models increases by 10-15%, depending on the type of tasks being solved, compared with models that do not use indicators of the level of protection of the body.

Keywords: adaptive potential, adaptive reserve, functions of the level of protection; the level of protection of the body; fuzzy decision rules.

Funding: The work was carried out as part of the implementation of the Southwest State University development program of the Priority 2030 project.

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

For citation: Rodionova S. N. A Method for Assessing the Level of Nonspecific Protection of the Human Body by Indicators Characterizing the Processes of Adaptation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(4): 175–192. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-4-175-192>.

Received 04.10.2023

Accepted 03.11.2023

Published 22.12.2023

Введение

Одним из фундаментальных свойств живого организма является его способность в ответ на многообразные воздействия окружающей среды включать сложнейшие механизмы адаптации, способные в определенных пределах обеспечивать нормальное функционирование живой системы, защищая человеческий организм от перехода из состояния здоровья в состояние болезни.

В многочисленных источниках имеется достаточно подробное описание защитных механизмов организма человека, реализуемых неспецифической (сопротивляемость организма) и специфической (иммунная система) системами защиты [1; 2; 3]. В терминах современной адаптологии защитные функции организма тесно связаны с такими

понятиями, как адаптационный потенциал и адаптационный резерв, которые, в свою очередь, связаны с понятием здоровья.

В работах по адаптологии приводятся различные определения адаптационного потенциала (АП) и адаптационного резерва (АР) во взаимосвязи с состоянием здоровья и функциональным состоянием. В контексте рассматриваемой работы под адаптационным потенциалом будем понимать показатель уровня приспособляемости организма человека к различным и меняющимся факторам внешней среды, а адаптационный резерв будем рассматривать как возможность организма противостоять воздействию различного вида нагрузок, адаптироваться к этим нагрузкам, минимизируя их воздействие и обеспечивая

должный уровень эффективности деятельности человека. В связи с этим оба эти понятия целесообразно использовать при решении задач оценки уровня защиты организма и тесно связанных с ними задач оценки состояния здоровья¹. Рассматривая вопросы количественной оценки УЗО, следует учитывать, что АП определяет уровень приспособляемости организма человека к факторам внешней среды, а УЗО – способность организма сопротивляться появлению и развитию заболеваний на различных уровнях организма. В этом заключается фундаментальное различие этих понятий.

В работах [4; 5; 6; 7; 8] было показано, что адаптационный потенциал и адаптационный резерв представляют собой классические нечеткие понятия, которые целесообразно описывать в рамках теории нечеткой логики принятия решений². С учетом этого для количественной оценки уровня защиты организма введем характеристическую функцию уровня защиты (ФУЗ) с областью значений на интервале $[0, \dots, 1]$. Нулевому значению ФУЗ соответствует слой функций защиты организма, способный привести к его гибели. Единичному значению ФУЗ соответствует такое состояние функции защиты, которое

позволяет сохранить здоровье и работоспособность организма с требуемым качеством. В качестве такой функции может быть выбрана функция принадлежности, например, к понятию «отличный уровень защиты».

В работах [7; 8] были получены модели оценки уровня защиты организма по таким показателям, как адаптационный потенциал сердечно-сосудистой системы, энергетический разбаланс общесистемных биологически активных точек, показатель адаптационного соответствия и иммунологические лабораторные показатели. В этих же работах было показано, что для решения задач прогнозирования, ранней и дифференциальной диагностики различных классов заболеваний, использующих в качестве одного из ведущих информативных показателей УЗО, целесообразно использовать методы нечеткой логики принятия решений, в частности, методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), разработанную в Юго-Западном государственном университете [4; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18].

Отличительной чертой МСГНРП является объединение интеллекта врачей (клиническое мышление), профессиональных знаний инженера-когнитолога с методами искусственного интеллекта.

¹ Крикунова Е. В. Методы и средства прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы с учетом защитных механизмов организма: дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2023. 152 с.

² Методы и средства прогнозирования и ранней диагностики заболеваний нервной системы с учетом защитных механизмов организма: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2023. С. 20.

Естественный интеллект врачей восполняет дефицит статистических данных, позволяя строить адекватные модели для плохоформализуемых задач. Инженер-когнитолог, взаимодействуя с профессионалами предметной области и используя данные разведочного анализа, выбирает модели, адекватные структуре данных решаемых задач.

Основными элементами правил принятия решений в МСГНРП, так же как и в классической парадигме мягких вычислений, являются функции принадлежности $\mu_{\omega_\ell}(x_i)$ к гипотезам (классам) ω_ℓ с базовыми переменными определяемыми существом решаемой задачи (информативные признаки, комплексные и интегральные показатели, вычисляемые различными способами, включая правила нечеткого вывода, коэффициенты уверенности KU_{ω_ℓ} по событиям ω_ℓ и т. д.). Применительно к задачам оценки УЗО к типовым элементам решающих правил добавляются ФУЗО со свойствами функций принадлежности.

С учетом нечеткой природы показателя уровня защиты было принято решение для уточнения информативной ценности моделей, полученных в работах [7; 8], использовать гибридный метод оценки информативности разработанный специально для применения при нечетком описании исследуемых переменных описанный в работе [19]. В результате этих исследований было показано,

что информативность моделей, полученных в работах [7; 8], составляет 0,49. Этот результат делает актуальной проблему разработки метода оценки УЗО по показателям, характеризующим механизмы адаптации с получением более высоких показателей информативности с последующим «встраиванием» этих показателей в соответствующие прогностические и диагностические решающие правила.

Материалы и методы

По современным представлениям процессы адаптации рассматриваются с позиций взаимодействия регулирующих и регулируемых систем. В состав регулирующих систем входят центральная (ЦНС) и вегетативная (ВНС) нервные системы, а также эндокринная и иммунная системы. К регулируемым системам относят органы и ткани. Согласование между регулируемыми и регулирующими системами осуществляет сердечно-сосудистая система (ССС) [20; 21]. Исходя из этих представлений и с учетом рекомендаций [3; 20; 21; 22; 23; 24; 25] для решения задачи оценки уровня защиты будем использовать показатели, получившие наибольшее применение в рамках современной адаптологии: показатель активности регуляторных систем по Р. М. Баевскому (ПАРС); показатели, характеризующие адаптационный потенциал системы кровообращения (ИФИ, АП, ПАС); показатель, характеризующий иммунно-

эндокринную составляющую адаптации по Л. Х. Гаркави (ИЭСА); показатель, характеризующий нервно-психическую составляющую адаптации (НПСА) по шкале И. Н. Гурвича. Такой подбор показателей позволяет производить оценку адаптационного потенциала (АР) на различных уровнях функционирования организма без учета природы внешних воздействий, что позволяет отнести их к классу неспецифических показателей по отношению к природе внешних воздействий, а следовательно, получаемые на их основе оценки УЗО без определенных типов преобразований также будут неспецифическими.

При разработке метода синтеза моделей оценки УЗО мы исходили из того, что описывающие эту характеристику организма показатели являются измеряемыми (с помощью специальной аппаратуры) признаками, а рассчитываемый уровень УЗО организма в целом (целевая функция) относится к классу нечетких, не строго и разноречиво определяемых в современной медицине понятий. Такая взаимосвязь между набором признаков и целевой функцией характерна для теории измерения латентных переменных. В таких условиях с учетом общих рекомендаций МСГНРП для оценки роли этих признаков в формировании понятия УЗО с последующей количественной его оценкой производится исследование «вклада» каждого из них в искомую латентную переменную с

использованием интерактивного пакета RUMM2020 [26; 27; 28; 29; 30; 31].

В ходе предварительного разведочного анализа при использовании интерактивного пакета RUMM 2020 для оценки связи индикаторных переменных ИФИ, ПАС ПАРС АП, ИЭСА и НПСА с латентной переменной «уровень защиты организма» экспертная группа из 8 человек определила список информативных признаков в составе ПАРС АП, ИЭСА и НПСА.

В соответствии с принятой методологией, при отсутствии возможности набора обучающей выборки для получения соответствующих функций защиты используется экспертный метод Дельфы, в ходе реализации которого эксперты отвечают на вопросы: при каких значениях параметра можно с достаточной степенью уверенности считать, что при заданных условиях жизнедеятельности вероятность появления и развития исследуемых классов заболеваний практически отсутствует; насколько уверенно можно делать вывод об отсутствии риска появления и развития искомых заболеваний; как в числовом виде соотносятся значения этой уверенности с мнением эксперта об уровне защиты организма, его органов и систем; при каких значениях параметра можно с достаточной степенью уверенности считать, что при заданных условиях жизнедеятельности вероятность появления и развития исследуемых классов заболеваний критически высока (по мнению эксперта

болезнь либо существует, либо почти неизбежно наступит в ближайшее время); насколько уверенно можно делать вывод о критической ситуации относительно рассматриваемых состояний организма (появление и развитие искомым заболеваний); как в числовом виде соотносятся значения этой уверенности с мнением эксперта об уровне защиты организма, его органов и систем; какова зависимость между значением исследуемого параметра и уровнем защиты.

Ответы на эти вопросы, по сути, задают координаты точек «перегиба» графиков функций уровня защиты в качестве аргумента (базовой переменной), для которого являются исследуемые показатели (ПАРС, АП и др.). Анализ известной литературы и собственные исследования показывают, что при выборе амплитудных характеристик следует учитывать, относительно каких структур организма производится оценка уровня защиты. Например, для показателя АП, являющегося аналогом ИФИ, в работе Р. М. Баевского показано, что он разработан для оценки характеристик всего организма, и приводятся данные о том, что он обладает наибольшей чувствительностью к наличию ранней стадии патологии сердечно-сосудистой системы, меньшее качество классификации обеспечивается для системы дыхания, значительно меньшее – для системы пищеварения [20]. Это позволяет сделать вывод о том, что, оценивая уровень защиты по АП этих систем, следует

пропорционально уменьшать соответствующие оценки их защитных свойств по данному показателю.

Таким образом, в ходе выполнения этого этапа исследований эксперты получают набор функций уровня защиты $f_{z_{\ell}}(AP_i)$ по показателю AP_i (i = ПАРС, АП, НПСА, ИЭСА) для выбранного уровня исследований, систем, подсистем и органов ℓ (ℓ = оо – организм в целом, сс – сердечно-сосудистая система, кс – кардиореспираторная система, с – сердце, л – легкое, ...).

Как следует из определения адапционного резерва (AR), он характеризует реакцию адапционных механизмов на определенную нагрузку, которая может выбираться с учетом рекомендаций резервометрии, используемой при оценке функциональных резервов [32; 33].

После выбора типа нагрузки по общепринятым в адаптологии рекомендациям для количественной оценки AR для выбранного показателя AP в рамках рекомендаций МСГНРП предлагается использовать два показателя: AN – отношение величины AP до воздействия нагрузкой $AP(0)$ и после воздействия $AP(N)$ и скорость AV восстановления AP за время наблюдения T_{HB} – $AV = [AP(0) - AP(N)]/T_{HB}$. В условиях нечеткой парадигмы определяются две частные функции уровня адапционного резерва: $f_{AR}(AN)$ и $f_{AR}(AV)$ с базовыми переменными AN и AV .

Адаптационный резерв для анализируемого показателя АР (ПАРС, АП и др.) определяется агрегацией частных функций уровня адаптационного резерва в соответствии с общими рекомендациями МСГНРП. Например, если показатели AN и AV , дополняя, «усиливают» друг друга, то адаптационный резерв показателя AP_i (i = ПАРС, АП, НПСА, ИЭСА) определяется выражением

$$AR_i = f_{AR_i}(AN_i) + f_{AR_i}(AV_i) - f_{AR_i}(AN_i) \cdot f_{AR_i}(AV_i). \quad (1)$$

В общем случае выражение (1) имеет вид

$$AR_{il} = AG_{il} [f_{AR_{il}}(AN_i), f_{AR_{il}}(AV_i)], \quad (2)$$

где AG_{il} – функция агрегации.

Используя показатели (2) как базовые переменные, определяют соответствующие наборы функций уровня защиты $f_{Z_{il}}(AP_i)$.

Интегральная оценка уровня защиты организма, его систем и органов определяется агрегацией соответствующих пар частных уровней защиты:

$$UZ_{il} = AG_{UZ} [f_{Z_{il}}(AP_i), f_{Z_{il}}(AR_i)]. \quad (3)$$

Без потери общности и качества вместо функций уровня защиты могут быть использованы функции принадлежности к лингвистическим переменным «максимально возможный уровень защиты». В зависимости от типа решаемых задач возможно

использование функций принадлежности к лингвистическим переменным «критически низкий уровень защиты». Различные типы функций принадлежности различным образом встраиваются в прогностические и диагностические решающие правила.

Если имеется возможность формирования обучающих выборок по классам уровней защиты (например, от крайне низкого уровня до отличного), определяемым по некоторым внешним критериям, например с использованием высокотехнологичного медицинского оборудования, то рекомендуется на шкалах AP_i и AR_i построить соответствующие признаковые гистограммы выделенных классов УЗО, по которым с использованием общих рекомендаций МСГНРП синтезировать соответствующие функции уровня защиты или функции принадлежности.

Алгоритм построения искомых функций по признаковым гистограммам достаточно подробно описан в работах [4; 8].

Результаты и их обсуждение

Используя описанный выше метод для неспецифической оценки уровня защиты, экспертная группа из восьми человек после трех итераций по методу Дельфы получила согласованные усредненные данные для построения функций уровня защиты на общесистемном уровне по показателям AP_i , приведенным ниже (табл. 1).

Таблица 1. Таблица опроса экспертов для построения функций уровня защиты**Table 1.** Expert survey table for building security level functions

Показатель	X1	Z1	X2	Z2	X3
ПАРС	2	0,6	9	0,2	кв
АП	7,2	0,5	9,8	0,2	кл
НПСА	12	0,5	24	0,3	кл
ИЭСА	28-34	0,4	<15 >45	0,2	кл

Примечание. Введены следующие обозначения: X1 – значения параметра можно с достаточной степенью уверенности считать, что при заданных условиях жизнедеятельности вероятность появления и развития исследуемых классов заболеваний практически отсутствует; Z1 – уровень защиты, соответствующий значению параметра X1; X2 – значения параметра, при котором можно с достаточной степенью уверенности считать, что при заданных условиях жизнедеятельности вероятность появления и развития исследуемых классов заболеваний критически высока (по мнению эксперта, болезнь либо существует, либо почти неизбежно наступит в ближайшее время); Z2 – уровень защиты, соответствующий значению параметра X2; X3 – характер зависимости (кл – кусочно-линейный; кв – квадратичный; лг – логарифмический; эп – экспоненциальный;...).

По данным таблицы 1 был получен следующий набор функций уровня защиты:

$$f_{Z_{\text{Парс}}}(\text{ПАРС}) = \begin{cases} 0,6, & \text{если ПАРС} < 2, \\ 0,6 - 0,016(2 - \text{ПАРС})^2, & \text{если } 2 \leq \text{ПАРС} < 5,5, \\ 0,2 + 0,016(9 - \text{ПАРС})^2, & \text{если } 5,5 \leq \text{ПАРС} < 9, \\ 0,2, & \text{если ПАРС} \geq 9, \end{cases}$$

$$f_{Z_{\text{Ап}}}(\text{АП}) = \begin{cases} 0,5, & \text{если АП} < 7,2, \\ -0,115 \text{ АП} + 1,327, & \text{если } 7,2 \leq \text{АП} < 9,8, \\ 0,2, & \text{если АП} \geq 9,8, \end{cases}$$

$$f_{Z_{\text{Нпса}}}(\text{НПСА}) = \begin{cases} 0,5, & \text{если НПСА} < 12, \\ -0,017 \text{ НПСА} + 0,708, & \text{если } 12 \leq \text{НПСА} < 24, \\ 0,3, & \text{если НПСА} \geq 24, \end{cases}$$

$$f_{Z_{\text{Иэса}}}(\text{ИЭСА}) = \begin{cases} 0,2, & \text{если ИЭСА} < 15, \\ 0,015 \text{ ИЭСА} - 0,03, & \text{если } 15 \leq \text{ИЭСА} < 28, \\ 0,4, & \text{если } 28 \leq \text{ИЭСА} < 34, \\ -0,018 \text{ ИЭСА} + 1,0,2, & \text{если } 34 \leq \text{ИЭСА} < 45, \\ 0,2, & \text{если ИЭСА} \geq 45. \end{cases}$$

Финальное выражение для оценки функций уровня защиты. При этом выбор типа функций агрегации определяют путем агрегации выбранных функций в соответствии с целями и задачами

использования показателя УЗО с учетом рекомендаций МСГНРП.

Если считается, что каждая из выбранных систем защиты вносит свой вклад в общий интегральный показатель таким образом, что увеличение защитных функций каждой системы увеличивает общий уровень защиты организма, то УЗО на общесистемном уровне UZI определяется с использованием модифицированной формулы Е. Шортлифа вида

$$UZI(q+1) = UZI(q) + Q(q+1)[1 - UZI(q)], \quad (4)$$

где $UZI(1) = UZ_{ПАРС} = Q(1)$; $Q(2) = UZ_{АП}$; $Q(3) = UZ_{НПСА}$; $Q(4) = UZ_{ИЭСА}$.

При осторожной стратегии, когда следует считать, что потеря защитных функций одной системы ведет к потере защитных функций всего организма, следует использовать агрегатор вида

$$UZI = \min(UZ_{ПАРС}, UZ_{АП}, UZ_{НПСА}, UZ_{ИЭСА}). \quad (5)$$

В последнем выражении не используемый в расчетах показатель заменяется единицей.

После синтеза решающих правил оценки уровня защиты на общесистемном, системном и органном уровнях в соответствии с общими рекомендациями МСГНРП устанавливается и обосновывается вид функций принадлежности к лингвистическим переменным, которые определяют частные уверенности в появлении и развитии патологии по задаче p ($p = \text{прогноз, ранняя стадия заболевания, степень тяжести патологии и др.}$).

Для повышения точности принимаемых решений для органов мишеней ω_ℓ определяются сопутствующие факторы риска, связанные с экологией, эргономикой, индивидуальными особенностями организма. Для оценки индивидуального состояния организма рекомендуется использовать: уровни психоэмоционального напряжения и утомления, данные опросов, осмотров, инструментальных и лабораторных исследований, принятых в традиционной медицинской практике.

Например, в работе [8] для решения задач прогнозирования, ранней и, возможно, дифференциальной диагностики исследуемого класса заболеваний предлагается синтезировать гибридные модели вида

$$F_\ell^P = AG_\ell^P(UZO_\ell^P, UFS_{B\ell}^P, UFR_{B\ell}^P, UFS_{D\ell}^P, UFR_{D\ell}^P, UFB_\ell^P, UER_\ell^P, UEK_\ell^P, UD_\ell^P), \quad (6)$$

где AG_ℓ^P – агрегатор составляющих финального решающего правила; UZO_ℓ^P – уверенность в ω_ℓ по задаче p от УЗО на общесистемном уровне; $UFS_{B\ell}^P, UFR_{B\ell}^P$ – уверенность в ω_ℓ по энергетическому разбалансу биологически активных точек (БАТ), связанных с уровнями функционального состояния (ФС) и функционального резерва (ФР); $UFS_{D\ell}^P, UFR_{D\ell}^P$ – уверенность в ω_ℓ , рассчитываемая по ФС и ФР, определяемая традиционными методами исследования; UFB_ℓ^P – уверенность в ω_ℓ , определяемая по электрическим характеристикам БАТ, связанных с

патологией ω_ℓ ; UER_ℓ^P – уверенность в ω_ℓ от уровня эргономики рабочего места; UEK_ℓ^P – уверенность в ω_ℓ от экологической нагрузки; UD_ℓ^P – уверенность в ω_ℓ по задаче p от индивидуального состояния здоровья.

В работе [7] приводятся другие варианты «встраивания» показателей УЗО в прогностические и диагностические модели.

Выводы

В работе предложен метод оценки уровня защиты по базовым показателям, характеризующим процессы адаптации, учитывающий специфику структуры данных и способы их обработки с целью достижения наилучших результатов по качеству и времени принимаемых решений. Используя предложенный метод, получены нечеткие функции уровня защиты по таким показателям, как показатель активности регуляторных систем по Р. М. Баевскому, показатель адапционного потенциала системы

кровообращения, показатель характеризующий иммунно-эндокринную составляющую адаптации по Л. Х. Гаркави, показатель, характеризующий нервно-психическую составляющую адаптации по шкале И. Н. Гурвича, по которым определяется интегральная оценка уровня защиты организма.

Для этих показателей получены функции уровня защиты и обобщенный показатель уровня защиты организма в виде нечеткого решающего правила. Показан механизм встраивания этого показателя в прогностические и диагностические решающие правила. В результате экспертного оценивания и математического моделирования было показано, что качество принятия решений с использованием предложенных моделей увеличивается на 10 – 15% в зависимости от типа решаемых задач по сравнению с моделями, не использующими показатели уровня защиты организма, что позволяет рекомендовать полученные результаты к практическому использованию в системе здравоохранения.

Список литературы

1. Орлов Р. С., Ноздрачев А. Д. Нормальная физиология. 2-е изд. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. 832 с.
2. Адо А. Д. Общее учение о болезни. Патологическая физиология / под ред. А. Д. Адо, В. И. Пыцкого, Г. В. Порядина, Ю. А. Владимирова. М.: Триада – X, 2000. С. 8–16.
3. Кузьмина В. Е., Беляков В. И. Основы адаптологии. 2-е изд. Самара: Самарский университет, 2013. 236 с.
4. Оценка и управление состояния здоровья обучающихся на основе гибридных интеллектуальных технологий: монография / Н. А. Корневский, А. Н. Шуткин,

С. А. Горбатенко, В. И. Серебровский. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2016. 472 с.

5. Использование информационных технологий для прогнозирования и диагностики инфекционных заболеваний (на примере генитального герпеса): монография / М. И. Лукашов, Н. А. Корневский, В. И. Серебровский [и др.]. Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова, 2011. 123 с.

6. Оценка защитных механизмов организма и их роль в задачах прогнозирования и медицинской диагностики / С. В. Харьков, С. Д. Долженков, С. Н. Корневская, А. Г. Коцарь // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2012. Т. 11, № 1. С. 44–49.

7. Использование показателей, характеризующих адаптационные механизмы, для оценки уровня защиты организма от воздействия внешних факторов риска / Р. И. Сафронов, 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.

8. 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. Корневский, С. Н. Родионова, Е. В. Крикунова, Р. И. Сафронов, В. А. Белозеров // Медицинская техника. 2022. Т. 3, № 333. С. 24–27.

9. Корневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. Т. 1, № 289. С. 33–35.

10. Корневский Н. А. Проектирование нечетких решающих сетей, настраиваемых по структуре данных для задач медицинской диагностики // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2005. Т. 4, № 1. С. 12–20.

11. Корневский Н. А. Метод синтеза гетерогенных нечетких правил для анализа и управления состоянием биотехнических систем // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 2. С. 99–103.

12. Синтез нечетких решающих правил для прогнозирования и ранней диагностики заболеваний, вызываемых состоянием окружающей среды, с учетом индивидуальных особенностей организма / Н. А. Корневский, Ю. А. Иванков, Е. А. Яковлева, Н. Н. Савченко // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2007. Т. 6, № 2. С. 395–400.

13. Серебровский В. В., Корневский Н. А. Метод оценки функционального резерва человека-оператора на основе комбинированных правил нечеткого вывода // Биотехносфера. 2012. Т. 1, № 19. С. 44–49.

14. Корневский Н. А., Башир А. С., Горбатенко С. А. Синтез гибридных нечетких правил для прогнозирования, оценки и управления состоянием здоровья в экологически неблагоприятных регионах // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 4. С. 69–73.
15. Корневский Н. А., Быков А. В., Устинов У. Г. Нечеткий алгоритм прогноза развития ишемической болезни конечностей для различных этапов ведения пациентов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2016. Т. 2, № 19. С. 142–155.
16. Корневский Н. А., Коптева Н. А., Крупчатников Р. А. Прогнозирование и ранняя диагностика заболеваний сельскохозяйственных рабочих на основе нечеткой логики принятия решений // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2008. Т. 4, № 7. С. 86–89.
17. Корневский Н. А., Тутов Н. Д., Лазурина Л. П. Проектирование медико-экологических информационных систем. Курск: Курский государственный технический университет, 2001. 193 с.
18. Корневский 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.
19. Метод комплексной оценки уровня информативности классификационных признаков в условиях нечеткой структуры данных / Н. А. Корневский, В. В. Аксенов, С. Н. Родионова, С. Н. Гонтарев, Л. П. Лазурина, Р. И. Сафронов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. № 3. С. 80–96.
20. Баевский Р. М., Берсенева А. П. Оценка адаптационных возможностей организма и риска заболеваний. М.: Медицина, 1997. 128 с.
21. Баевский Р. М., Иванов Г. Г. Вариабельность сердечного ритма: теоретические аспекты и возможности клинического применения. М.: Медицина. 2000. 295 с.
22. Гаркави Л. Х., Уколова М. А., Квакина Е. Б. Закономерность развития качественно отличающихся общих неспецифических адаптационных реакций организма // Научные открытия России. URL: <https://ross-nauka.narod.ru/03/03-158.html> (дата обращения: 10.09.2023).
23. Гаркави Л. Х., Квакина Е. Б., Уколова М. А. Адаптационные реакции и резистентность организма. Ростов н/Д: Ростовский университет, 1990. 224 с.
24. Гурвич И. Н. Социальная психология здоровья. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 1999. 1023 с.

25. Хурса Р. В., Еремина Н. М., Корзун Н. Н. Скрининговые методы оценки адаптации организма в амбулаторной практике. Минск: Белорусский государственный медицинский университет, 2018. 43 с.
26. Оценка и управление состоянием здоровья на основе моделей Г. Раша / Н. А. Кореневский, А. Н. Шуткин, Е. А. Бойцова, В. В. Дмитриева // Медицинская техника. 2015. Т. 6, № 294. С. 37–40.
27. Smith E. V., Smith M. S. Introduction to Rasch Measurement Theory, Models and Applications. Marle Grove, Minnesota: JAM Press, 2004. 689 p.
28. Маслак А. А. Измерение латентных переменных в социально-экономических системах: монография. Славянск-на-Кубани: Издательский центр СГПИ, 2006. 333 с.
29. Andrich D. Rasch Models for Development. London: Sage Publications, Inc., 1988. 94 p.
30. Bond T. G., Fox C. M. Applying the Rasch model. Fundamental Measurement in the Human Sciences. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Publishers, 2001. 255 p.
31. Rasch G. Probabilistic models for some intelligence anent tests (Expanded edition, with foreword and afterword by Benjamin D. Wright). Chicago: University of Chicago Press, 1980. 199 p.
32. Совершенствование оценки функциональных резервов организма – приоритетное направление развития донозологической диагностики преморбидных состояний / А. Н. Курзанов, А. Н. Заболотских, Д. В. Ковалев, Д. А. Бузиашили // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 10-1. С. 67–70.
33. Курзанов А. Н., Заболотских Н. В., Ковалев Д. В. Функциональные резервы организма: монография. М.: Издательский дом Академии естествознания, 2016. 96 с.

References

1. Orlov R. S., Nozdrachev A. D. Normal'naya fiziologiya [Normal physiology]. 2nd ed. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2010. 832 p.
2. Ado A. D. Obshchee uchenie o bolezni. Patologicheskaya fiziologiya [The general doctrine of the disease. Pathological physiology]; ed. by A. D. Ado, V. I. Pytsky, G. V. Ordin, Yu. A. Vladimirova. Moscow, Triad Publ.– X, 2000, pp. 8–16.
3. Kuzmina V. E., Belyakov V. I. Osnovy adaptologii [Fundamentals of adaptology]. 2nd ed. Samara, Samara University Publ., 2013. 236 p.
4. Korenevsky N. A., Shutkin A. N., Gorbatenko S. A., Serebrovsky V. I. Ocenka i upravlenie sostoyaniya zdorov'ya obuchayushchihsya na osnove gibridnyh intellektual'nyh tekhnologij [Assessment and management of the health status of students based on hybrid intelligent technologies]. Stary Oskol, Thin science-intensive technologies Publ., 2016. 472 p.

5. Lukashov M. I., Korenevsky N. A., Serebrovsky V. I. eds. Ispol'zovanie informacionnyh tekhnologij dlya prognozirovaniya i diagnostiki infekcionnyh zabolevanij (na primere genital'nogo gerpesa) [The use of information technologies for the prediction and diagnosis of infectious diseases (using the example of genital herpes)]. Kursk, Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov Publ., 2011. 123 p.

6. Kharkov S. V., Dolzhenkov S. D., Korenevskaya S. N., Kotsar A. G. Ocenka zashchitnyh mekhanizmov organizma i ih rol' v zadachah prognozirovaniya i medicinskoj diagnostiki [Assessment of the protective mechanisms of the body and their role in the tasks of forecasting and medical diagnostics]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2012, vol. 11, no. 1, pp. 44–49.

7. Safronov R. I., Rodionova S. N., Krikunova E. V., Starodubtseva L. V., Sergeeva S. S., Titova A. V. Ispol'zovanie pokazatelej, harakterizuyushchih adaptacionnye mekhanizmy, dlya ocenki urovnya zashchity organizma ot vozdejstviya vneshnih faktorov riska [The use of indicators characterizing adaptive mechanisms to assess the level of protection of the body from the effects of external risk factors]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 163–179.

8. Korenevsky N. A., Rodionova S. N., Krikunova E. V., Safronov R. I., Belozerov V. A. Metody kolichestvennoj ocenki zashchitnyh mekhanizmov organizma na razlichnyh ego urovnjah na osnove gibridnyh nechetkih modelej i ih ispol'zovanie v zadachah prognozirovaniya i medicinskoj diagnostiki [Methods of quantitative assessment of the protective mechanisms of the body at its various levels based on hybrid fuzzy models and their use in forecasting and medical diagnostics]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2022, vol. 3, no. 333, pp. 24–27.

9. Korenevsky N. A. Ispol'zovanie nechetkoj logiki prinyatiya reshenij dlya medicinskih ekspertnyh sistem [Using fuzzy decision logic for medical expert systems]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2015, vol. 1, no. 289, pp. 33–35.

10. Korenevsky N. A. Proektirovanie nechetkih reshayushchih setej, nastraivaemyh po strukture dannyh dlya zadach medicinskoj diagnostiki [Design of fuzzy decision networks, configurable by data structure for medical diagnostics tasks]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2005, vol. 4, no. 1, pp. 12–20.

11. Korenevsky N. A. Metod sinteza geterogennyh nechetkih pravil dlya anali-za i upravleniya sostoyaniem biotekhnicheskikh sistem [Method of synthesis of heterogeneous fuzzy rules for the analysis and management of the state of biotechnical systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University*.

Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering, 2013, no. 2, pp. 99–103.

12. Korenevsky N. A., Ivankov Yu. A., Yakovleva E. A., Savchenko N. N. Sintez nechetkih reshayushchih pravil dlya prognozirovaniya i rannej diagnostiki zabolevanij, vyzyvayemyh sostoyaniem okruzhayushchej sredy, s uchetom individual'nyh osobennostej organizma [Synthesis of fuzzy decision rules for the prediction and early diagnosis of diseases caused by the state of the environment, taking into account the individual characteristics of the body]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomeditsinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2007, vol. 6, no. 2, pp. 395–400.

13. Serebrovsky V. V., Korenevsky N. A. Metod ocenki funkcional'nogo rezerva cheloveka-operatora na osnove kombinirovannyh pravil nechetkogo vyvoda [A method for assessing the functional reserve of a human operator based on combined rules of fuzzy inference]. *Biotekhnosfera = Biotechnosphere*, 2012, vol. 1, no. 19, pp. 44–49.

14. Korenevsky N. A., Bashir A. S., Gorbatenko S. A. Sintez gibridnyh nechetkih pravil dlya prognozirovaniya, ocenki i upravleniya sostoyaniem zdorov'ya v ekologicheski neblagopriyatnyh regionah [Synthesis of hybrid fuzzy rules for forecasting, assessment and management of health in ecologically unfavorable regions]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2013, no. 4, pp. 69–73.

15. Korenevsky N. A., Bykov A. V., Ustinov U. G. Nechetkij algoritm prognoza razvitiya ishemicheskoy bolezni konechnostej dlya razlichnyh etapov vedeniya pacientov [Fuzzy algorithm for predicting the development of ischemic limb disease for various stages of patient management]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Management, Computer engineering, computer science. Medical instrumentation = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2016, vol. 2, no. 19, pp. 142–155.

16. Korenevsky N. A., Kopteva N. A., Krupchatnikov R. A. Prognozirovanie i rannaya diagnostika zabolevanij sel'skohozyajstvennyh rabochih na osnove nechetkoj logiki prinyatiya reshenij [Forecasting and early diagnosis of diseases of agricultural workers based on fuzzy logic of decision-making]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2008, vol. 4, no. 7, pp. 86–89.

17. Korenevsky N. A., Tutov N. D., Lazurina L. P. Proektirovanie mediko-ekologicheskikh informacionnyh sistem [Design of medical and environmental information systems]. Kursk, Kursk State Technical University Publ., 2001. 193 p.

18. Korenevsky N. A., Rodionova S. N., Khripina I. I. Metodologiya sinteza gibridnyh nechetkih reshayushchih pravil dlya medicinskih intellektual'nyh sistem podderzhki prityani

reshenij [Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems]. Stary Oskol, TNT Publ., 2019. 472 p.

19. Korenevsky N. A., Aksenov V. V., Rodionova S. N., Gontarev S. N., Lazurina L. P., Safronov R. I. Metod kompleksnoj ocenki urovnya informativnosti klassifikacionnyh priznakov v usloviyah nechetkoj struktury dannyh [The method of complex assessment of the level of informativeness of classification features in conditions of a fuzzy data structure]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Management, Computer engineering, computer science. Medical instrumentation = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2023, no. 3, pp. 80–96.

20. Baevsky R. M., Berseneva A. P. Ocenka adaptacionnyh vozmozhnostej organizma i riska zabolevanij [Assessment of the adaptive capabilities of the body and the risk of diseases]. Moscow, Medicine Publ., 1997. 128 p.

21. Baevsky R. M., Ivanov G. G. Variabel'nost' serdechnogo ritma: teoreticheskie aspekty i vozmozhnosti klinicheskogo primeneniya [Heart rate variability: theoretical aspects and possibilities of clinical application]. Moscow, Medicine Publ., 2000. 295 p.

22. Garkavi L. H., Ukolova M. A., Kvakina E. B. Zakonomernost' razvitiya kachestvenno otlichayushchih obshchih nespecificheskikh adaptacionnyh reakcij organizma [The pattern of development of qualitatively different general nonspecific adaptive reactions of the body]. *Nauchnye otkrytiya Rossii [Scientific discoveries of Russia]*. Available: <https://rossnauka.narod.ru/03/03-158.html>. (accessed 10.09.2023)

23. Garkavi L. H., Kvakina E. B., Ukolova M. A. Adaptacionnye reakcii i rezistentnost' organizma [Adaptive reactions and resistance of the body]. Rostov-on-Don, Rostov University Publ., 1990. 224 p.

24. Gurvich I. N. Social'naya psihologiya zdorov'ya [Social psychology of health]. St. Petersburg, St. Petersburg University Press Publ., 1999. 1023 p.

25. Khurs R. V., Eremina N. M., Korzun N. N. Skriningovye metody ocenki adaptacii organizma v ambulatornoj praktike [Screening methods for assessing the adaptation of the body in outpatient practice]. Minsk, Belarusian State Medical University Publ., 2018. 43 p.

26. Korenevsky N. A., Shutkin A. N., Boitsova E. A., Dmitrieva V. V. Ocenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya na osnove modelej G. Rasha [Assessment and management of health status based on G. Rush models]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Technology*, 2015, vol. 6, no. 294, pp. 37–40.

27. Smith E. V., Smith M. S. Introduction to Rasch Measurement Theory, Models and Applications. Marle Grove, Minnesota, JAM Press Publ., 2004. 689 p.

28. Maslak A. A. Izmerenie latentnyh peremennyh v social'no-ekonomicheskikh sistemah [Measurement of latent variables in socio-economic systems]. Slavyansk-on-Kuban, Publishing Center of the SSPI, 2006. 333 p.

29. Andrich D. Rasch Models for Development. London, Sage Publications, Inc. Publ., 1988. 94 p.
30. Bond T. G., Fox C. M. Applying the Rasch model. Fundamental Measurement in the Human Sciences. Mahwah, New Jersey, Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Publishers, 2001. 255 p.
31. Rasch G. Probabilistic models for some intelligence anent tests (Expanded edition, with foreword and afterword by Benjamin D. Wright). Chicago, University of Chicago Press, 1980. 199 p.
32. Kurzanov A. N., Zabolotskikh A. N., Kovalev D. V., Buziashvili D. A. Sovershenstvo-
vanie ocenki funktsional'nykh rezervov organizma – prioritnoe napravlenie razvitiya donozo-
logicheskoy diagnostiki premorbidnykh sostoyanij [Improving the assessment of functional re-
serves of the body is a priority direction for the development of prenosological diagnosis of
premorbid conditions]. *Mezhdunarodnyj zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya = Interna-
tional Journal of Experimental Education*, 2015, vol. 10, no. 1, pp. 67–70.
33. Kurzanov A. N., Zabolotskikh N. V., Kovalev D. V. Funktsional'nye rezervy or-
ganizma [Functional reserves of the body]. Moscow, Publishing House of the Academy of
Natural Sciences, 2016. 96 p.

Информация об авторе / Information about the Author

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

Sofia N. Rodionova, Cand. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, 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

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 , ν 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 обязателен** 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/>.