

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

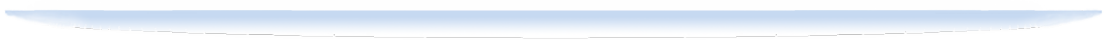
Известия

**Юго-Западного
государственного университета**

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

Научный журнал

Том 13 № 2 / 2023



Proceedings

**of the Southwest
State University**

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

Scientific Journal

Vol. 13 № 2 / 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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Адрес учредителя, издателя и редакции:

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

Телефон: +7(4712) 22-25-26,

Факс: +7(4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:

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

ISSN 2223-1536 (Print)

Префикс DOI: 10.21869

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

© Юго-Западный государственный университет, 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 30.06.2023. Формат 60×84/8.

Дата выхода в свет 19.07.2023.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 21,4.

Тираж 1000 экз. Заказ 32.

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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Konstantin V. 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 30.06.2023. Format 60×84/8.

Release date 19.07.2023.

Offset paper. Printer's sheets: 21,4.

Circulation 1000 copies. Order 32.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ	8
<i>Оригинальные статьи</i>	
Метод определения типа дыхания человека на базе машинного обучения	8
<i>Зубков А. В., Донская А. Р., Маренков Я. А., Гомазкова Ю. С., Болгов Д. А.</i>	
МЕХАТРОНИКА, РОБОТОТЕХНИКА.....	31
<i>Оригинальные статьи</i>	
Оценка дальности передачи видеоинформации различного качества при мониторинге чрезвычайных ситуаций с беспилотного летательного аппарата.....	31
<i>Алемпьев М. Ю., Коптев Д. С., Довбня В. Г., Скрипкина Е. В.</i>	
РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ	45
<i>Оригинальные статьи</i>	
Автоматизированное распознавание и контроль взаимодействия людей по видеоизображению	45
<i>Ульев А. Д., Донская А. Р., Зубков А. В.</i>	
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ.....	65
<i>Оригинальные статьи</i>	
Оценка эффективности контроля технического состояния сложного технического объекта с учетом экспертных оценок	65
<i>Нестерович С. А., Брежнева А. Н.</i>	
Системный анализ и математическое моделирование инфекционной безопасности заболевания, вызываемого штаммами коронавируса COVID-19	76
<i>Костарев С. Н., Файзрахманов Р. А., Татарникова Н. А., Новикова О. В., Середа Т. Г.</i>	
Информационная поддержка принятия решения по оценке противопожарных расстояний от границ открытых площадок для хранения АТС	95
<i>Волошенко А. А., Шевцов М. В., Денисов А. Н.</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	112
<i>Оригинальные статьи</i>	
Самооценка качества жизни и сформированности здорового образа жизни студентов-медиков.....	112
<i>Шепелева О. М., Лазурина Л. П., Куркина М. П., Маль Г. С., Доценко В. А., Завидовская К. В.</i>	
Система электронной аускультации: метод измерения амплитудно-частотных характеристик стетоскопов	125
<i>Макалов А. О., Смирнов В. А., Прохорцов А. В.</i>	
Система электронной аускультации: обработка аускультативных данных.....	137
<i>Макалов А. О., Смирнов В. А., Прохорцов А. В.</i>	
Математическая модель обработки мультиспектральных данных для мобильной платформы экологического мониторинга	153
<i>Слевакова С. В., Слеваков А. Г., Чернецкая И. В.</i>	
Прогнозирование и ранняя диагностика бронхиальной астмы у работников, специализирующихся на аргонной сварке на основе нечетких математических моделей	170
<i>Григорьев И. Ю., Стародубцева Л. В., Серегин С. П., Шульга Л. В.</i>	
К сведению авторов.....	184

CONTENT

INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS	8
<i>Original articles</i>	
A Method for Determining the Type of Human Breathing Based on Machine Learning	8
<i>Zubkov A. V., Donskaia A. R., Marenkov Y. A., Gomazkova Y. S., Bolgov D. A.</i>	
MECHATRONICS, ROBOTICS	31
<i>Original articles</i>	
Evaluation of the Transmission Range of Videoinformation of Various Quality when Monitoring Emergency Situations from an Unmanned Aerial Vehicle	31
<i>Alepiev M. Y., Koptev D. S., Dovbnya V. G., Skripkina E. V.</i>	
IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING	45
<i>Original articles</i>	
Automated Recognition and Control of Human Interaction by Video Image	45
<i>Ulyev A. D., Donskaia A. R., Zubkov A. V.</i>	
SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING	65
<i>Original articles</i>	
Assessment of the Effectiveness of Monitoring the Technical Condition of a Complex Technical Object, Taking Into Account Expert Assessments	65
<i>Nesterovich S. A., Brezhneva A. N.</i>	
System Analysis and Mathematical Modeling of Infection Safety Human Caused by COVID-19 Coronavirus Strains	76
<i>Kostarev S. N., Fayzrakhmanov R. A., Tatarnikova N. A., Novikova O. V., Sereda T. G.</i>	
Information Support for Decision-Making According to the Assessment of Fire-Fighting Distances from the Borders of Open Areas for PBX Storage	95
<i>Voloshenko A. A., Shevtsov M. V., Denisov A. N.</i>	
MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS	112
<i>Original articles</i>	
Self-Assessment of the Quality of Life and the Formation of a Healthy Lifestyle of Medical Students	112
<i>Shepeleva O. M., Lazurina L. P., Kurkina M. P., Mal G. S., Dotsenko V. A., Zavidovskaya K. V.</i>	
Electronic Auscultation System: a Method for Measuring the Amplitude-Frequency Characteristics of Stethoscopes	125
<i>Makalov A. O., Smirnov V. A., Prokhortsov A. V.</i>	
Electronic Auscultation System: Processing of Auscultatory Data	137
<i>Makalov A. O., Smirnov V. A., Prokhortsov A. V.</i>	
Mathematical Model of Multispectral Data Processing for a Mobile Ecology Monitoring Platform	153
<i>Spevakova S. S., Spevakov A. G., Chernetskaya I. V.</i>	
Prediction and Early Diagnosis of Bronchial Asthma in Workers Specializing in Argon Welding Based on Fuzzy Mathematical Models	170
<i>Grigorov I. Y., Starodubtseva L. V., Seregin S. P., Shulga L. V.</i>	
Information for Authors	184

Метод определения типа дыхания человека на базе машинного обучения

А. В. Зубков¹ ✉, А. Р. Донская¹, Я. А. Маренков¹,
Ю. С. Гомазкова¹, Д. А. Болгов¹

¹ Волгоградский государственный технический университет
пр-т им. В. И. Ленина, д. 28, г. Волгоград 400005, Российская Федерация

✉ e-mail: zubkov.alexander.v@gmail.com

Резюме

Целью исследования является повышение эффективности дыхательной реабилитации за счет разработки автоматизированных методов определения типа дыхания на базе машинного обучения.

Методы. После пандемии COVID-19 особую важность приобрела респираторная реабилитация, а также методы домашней (удаленной) реабилитации по средствам, предоставляемым современными технологиями, для осуществления которой стали разрабатываться новые методы и средства, в том числе с использованием беспроводных датчиков или систем захвата движения. Особое внимание в ходе дыхательной реабилитации уделяется типу дыхания человека, а также автоматизированным методам по анализу дыхания. На данный момент встает проблема, что большинство разработанных методов по анализу дыхания не работают с типами дыхания: они либо определяют только один тип, например, диафрагмальный, либо просто анализируют состояние легких. В связи с этим возникает потребность в разработке метода для анализа и определения непосредственно типов дыхания человека.

В данной статье рассматриваются три метода для решения задачи определения типа дыхания человека с помощью системы захвата движений и машинного обучения. Первый метод основывается на статических характеристиках, для которого использовалась модель Random Forest. Второй метод, в основе которого используются временные характеристики, использовал модель Catch22. Третий метод, который определяет тип дыхания с помощью характеристик синусоиды, использовал составную модель, основанную на двух моделях Hist Gradient Boosting.

Результаты. Были разработаны три метода для определения типа дыхания человека. Для каждого из методов были обучены модели машинного обучения для нахождения наилучшего результата точности. После проведения сравнительного анализа разработанных подходов определен подход с наилучшей точностью.

Заключение. Разработан метод определения типа дыхания человека на базе машинного обучения, точность работы которого составляет 0,81.

Ключевые слова: анализ типа дыхания; классификация временных данных; модели машинного обучения для классификации данных.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке ВолгГТУ в рамках научного проекта № 60/478-22, № 60/473-22.

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

Для цитирования: Метод определения типа дыхания человека на базе машинного обучения / А. В. Зубков, А. Р. Донская, Я. А. Маренков, Ю. С. Гомазкова, Д. А. Болгов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 8–30. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-8-30>.

Поступила в редакцию 02.04.2023

Подписана в печать 20.04.2023

Опубликована 30.06.2023

A Method for Determining the Type of Human Breathing Based on Machine Learning

Alexander V. Zubkov¹ ✉, Anastasia R. Donskaia¹, Yaroslav A. Marenkov¹,
Yulia S. Gomazkova¹, Dmitry A. Bolgov¹

¹ Volgograd State Technical University
28 V. I. Lenin Ave., Volgograd 400005, Russian Federation

✉ e-mail: zubkov.alexander.v@gmail.com

Abstract

The purpose of research is to increase the effectiveness of respiratory rehabilitation through the development of automated methods for determining the type of breathing based on machine learning.

Methods. After the COVID-19 pandemic, respiratory rehabilitation became particularly important, as well as methods of home (remote) rehabilitation using the means provided by modern technologies, for which new methods and means began to be developed, including using wireless sensors or motion capture systems. Special attention during respiratory rehabilitation is paid to the type of human breathing, as well as automated methods for analyzing breathing. At the moment, the problem arises that most of the developed methods for analyzing breathing do not work with types of breathing: they either determine only one type, for example, diaphragmatic, or simply analyze the condition of the lungs. In this regard, there is a need to develop a method for analyzing and determining directly the types of human respiration.

This article discusses three methods for solving the problem of determining the type of human breathing using a motion capture system and machine learning. The first method is based on static characteristics, for which the Random Forest model was used. The second method, which is based on time characteristics, used the Catch22 model. The third method, which determines the type of respiration using the characteristics of the sinusoid, used a composite model based on two models of Hist Gradient Boosting.

Results. Three methods have been developed to determine the type of human breathing. Machine learning models were trained for each of the methods to find the best accuracy result. After conducting a comparative analysis of the developed approaches, the approach with the best accuracy is determined.

Conclusion. A method for determining the type of human breathing based on machine learning has been developed, the accuracy of which is 0.81.

Keywords: breath type analysis; time data classification; machine learning models for data classification.

Funding: The reported study was funded by VSTU according to the research project No. 60/478-22, 60/473-22.

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

For citation: Zubkov A. V., Donskaia A. R., Marenkov Y. A., Gomazkova Y. S., Bolgov D. A. A Method for Determining the Type of Human Breathing Based on Machine Learning. *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(2): 8–30. (In Russ.) [https://doi.org/ 10.21869/2223-1536-2023-13-2-8-30](https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-8-30).

Received 02.04.2023

Accepted 29.04.2023

Published 30.06.2023

Введение

Дыхание является одним из важнейших физиологических процессов человека. Оно осуществляется за счет диафрагмы и межреберных мышц, что приводит к изменению объема грудной полости и дыхательных путей. В данной статье рассматриваются три типа дыхания:

- 1) брюшной;
- 2) грудной;
- 3) смешанный [1; 2; 3].

Одним из общепринятых методов для определения типа дыхания является визуальный анализ, проводимый медицинским персоналом. Пациента сажают или кладут так, чтобы спина находилась в прямом естественном положении. Медицинский работник становится рядом с пациентом и смотрит за отклонениями тела во время дыхания. Если преобладает смещение грудины, у человека преобладает грудной тип дыхания. Если преобладает смещение брюшины, то у человека преобладает брюшной тип дыхания. Если смещение происходит приблизительно синхронно, то у человека смешанный тип дыхания [1].

Нарушение дыхания сигнализирует о развитии заболеваний как в дыхатель-

ной системе человека, так и в других системах организма. Одним из признаков нарушения дыхательной функции является тип дыхания. Неправильный тип дыхания может являться одним из первоисточников кашля, одышки и других симптомов, а также сигнализировать о более серьезных заболеваниях.

Изучение и разработка методов определения типа дыхания могут использоваться, например, для контроля состояния здоровья, повышения эффективности лечения и реабилитации или для диагностики некоторых заболеваний.

В последнее время увеличился интерес к изучению дыхания. Вспышка коронавирусной инфекции в 2019 г. подтолкнула многие сферы к развитию [4; 5], исключением не стала и сфера дыхательной реабилитации. Так в исследовании Brown Ch и др. [6] изучались возможности использования респираторных звуков дыхания человека в качестве диагностических маркеров COVID-19 с последующим определением COVID-19 у людей с кашлем посредством моделей неглубокого обучения. Также исследовалась возможность бесконтактного изучения органов дыхания у пациентов с COVID-19 при помощи инфракрасных датчиков RGB для анализа характера

дыхания с помощью нейронных сетей в исследовании Avuthu B. и др. [7]

Дыхание и его особенности исследовали и до появления COVID-19. Например, B. Schoun и другие [8] изучали возможность бесконтактного определения характеристик дыхания с помощью тепловых данных и последующего применения методов машинного обучения в режиме реального времени.

Также в исследовании Alikhani L. и др. [9] определялась частота дыхания с данных, полученных при ЭКГ (полученная точность – 85%). В исследовании Yanbin Gong и другими [10] определялся только грудной тип дыхания с помощью дыхательных ремней (полученная точность – 95%). В исследовании Adib F. и др. [11] наличие дыхания определялось с помощью радиоволн, а именно роутера Wi-Fi (полученная точность – 99%), но в данном исследовании было всего 14 испытуемых, что является довольно малой выборкой для полномасштабного исследования.

Командой исследователей Hai Anh Tran [12] изучалась возможность упрощенного проведения спирометрического анализа с помощью устройства под управлением Android (средняя ошибка составила 8%), однако в данном исследовании было относительно небольшое число испытуемых – 17 (на 15-ти модель обучалась и на 2-х модель тестировалась).

Однако ни одно исследование до сих пор не затрагивало изучение методов автоматизированного определения

типов дыхания, которые могли бы облегчить лечение дыхательной недостаточности или позволить реализовать реабилитацию, например постковидную, в удаленном формате.

Автоматизация процесса определения типа дыхания может упростить работу медицинскому персоналу, занимающемуся диагностикой, лечением и реабилитацией заболеваний, которые требуют определения типа дыхания. Также автоматизация позволит проводить консультации или лечение, что, как показывает практика пандемии COVID-19, может быть крайне востребованным.

Из всего вышесказанного следует, что существует потребность в разработке единого подхода к определению типов дыхания.

Авторами была поставлена цель – повышение эффективности дыхательной реабилитации за счет разработки автоматизированных методов определения типа дыхания на базе машинного обучения.

План исследования

Для определения типов дыхания с помощью методов машинного обучения необходимо использовать данные, содержащие выделенные типы дыхания (грудной, брюшной, смешанный). На данный момент отсутствуют уже готовые датасеты, поэтому было принято решение о самостоятельном наборе интересных для нас данных.

Для набора данных было приглашено 86 добровольцев. Сбор данных

осуществлялся с помощью системы захвата движения. Предварительно перед началом записи данных с участников собиралась дополнительная информация:

- пол;
- дата рождения;
- факт болезни коронавирусной инфекцией;
- даты заболевания последнего случая коронавирусной инфекции при ее наличии;
- процент поражения легких, при его наличии;
- присутствие респираторных заболеваний на момент замера.

Все данные собирались обезличенно.

Перед началом записи данных обученный ассистент разъяснял, как необходимо правильно дышать для соответствующего типа дыхания, и визуально наблюдал за корректностью дыхания испытуемого. Каждый доброволец мог фиксировать часть туловища ладонью, чтобы ограничить движение мышц, которые не задействованы при измеряемом типе дыхания. Каждая запись длилась 1 минуту.

Таким образом собирались данные о следующих типах дыхания:

- обычном – без специальных требований, привычное для добровольца дыхание;
- грудном – дыхательные движения выполняются за счет сокращения межреберных мышц;
- брюшном – дыхательные движения осуществляются преимущественно с помощью брюшного пресса и диафрагмы;
- смешанном – происходит при одновременном участии межреберных мышц и диафрагмы [1].

Все измерения производились с помощью системы захвата движений, состоящей из трех маркеров, которые фиксировались с помощью поясов на теле испытуемого. Маркеры крепились соответственно на груди в районе мечевидного отростка (точка А), на позвоночнике между 9 и 11 грудными позвонками (точка В), на животе выше пупка (точка С). На рисунке 1 представлена схема расположения маркеров.

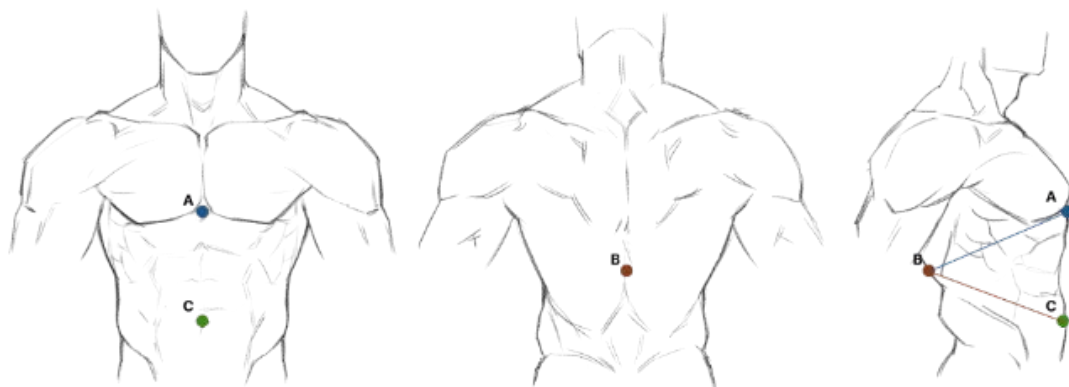


Рис. 1. Схема расположения маркеров

Fig. 1. Layout of markers

Каждый отдельный маркер отслеживал свое положение в пространстве и передавал эти данные в программу. Данная программа позволяла фиксировать информацию о добровольце и данные с маркеров. По результатам работы программы получался один файл формата tsv, содержащий данные об изменениях позиций маркеров в пространстве с течением времени и дополнительной информацией, собранной до начала записи данных.

Предобработка данных

Прежде чем приступить к тренировке моделей машинного обучения, данные, полученные в процессе эксперимента, необходимо было предварительно обработать. В ходе проведения предобработки данных учитывались следующие аспекты: количество замеров для каждого испытуемого должно равняться 4 – по одному на каждый тип дыхания; каждый замер должен длиться одну минуту.

При проведении предобработки были выявлены следующие недочеты собранных данных: у некоторых испытуемых имелись лишние замеры, которые дублировали один типа дыхания, – такие записи удалялись; были найдены замеры, длительность которых составляла значительно меньше минуты, – такие замеры рассматривались в качестве статистических выбросов.

Оставшиеся статистические выбросы обнаруживались с помощью метода межквартильного диапазона. Под данным методом подразумевается разность между третьим (Q3) и первым (Q1)

квартилями выборки данных, которая позволяет оценить разброс 50% выборки и исключить статистические выбросы. Под статистическими выбросами понимались записи, для которых значения вычисленных характеристик, а именно частоты и амплитуды были меньше нижней границы или больше верхней границы.

Также все числовые данные были промасштабированы, все категориальные характеристики были приведены к числовому виду, необходимому для обучения, а именно добавлялись колонки, соответствующие каждой категории, единица в совокупности которых означала данную категорию. Полученная выборка была разбита на две – тренировочную (60% исходной выборки) и тестовую (40% исходной выборки) [13].

Материалы и методы

Рассмотрим методы определения типа дыхания с помощью машинного обучения:

1. *Первый метод.* В качестве первого метода авторами было принято решение использовать стандартные модели машинного обучения со статическими характеристиками. В качестве таких характеристик использовались данные, полученные от добровольцев, и вычисленные характеристики – частота и средняя амплитуда дыхания.

Для нахождения амплитуд и частоты вдохов / выдохов использовались минимумы и максимумы функции сезонности изменения расстояний между соответствующими маркерами (например, для грудного дыхания рассматривалось расстояние между маркерами А и В, для

брюшного дыхания – между В и С). Чтобы убрать шумы, содержащиеся в функции, она предварительно сглаживалась с помощью фильтра Савицкого-Голея. Средняя амплитуда находилась как среднее арифметическое всех амплитуд. Частота находилась как отношение количества циклов вдохов / выдохов ко времени замера.

Для данного метода было решено использовать следующие модели классификации: Decision Tree, Random Forest, k-Nearest Neighbors и Hist Gradient Boosting, а также составные модели, основанные на данных классификаторах. Составная модель состоит из двух последовательных классификаторов. Первый определял, смешанный ли это тип дыхания. Вторым, в случае, если первый классификатор опре-

делил, что тип дыхания не является смешанным, относил найденный тип дыхания к грудному или брюшному.

На вход моделям подавались следующие данные: пол, факт болезни коронавирусной инфекцией, факт поражения легких, процент поражения легких, а также средняя амплитуда и частота дыхания.

По итогу использования данного метода наилучший результат показала модель Random Forest.

Random Forest – модель машинного обучения, которая создает набор деревьев решений, каждое дерево строится на основании либо всей выборки, либо на ее случайной части [14]. В таблице 1 приведены гиперпараметры для данной модели.

Таблица 1. Гиперпараметры для Random Forest

Table 1. Hyperparameters for Random Forest

Гиперпараметр Hyperparameter	Краткое описание Short Description	Значение Value
n_estimators	Количество деревьев решений в случайном лесу	10
criterion	Критерий, оценивающий качество разбиения на каждом узле дерева	“gini”
max_depth	Наибольшая глубина деревьев решений	5
min_samples_split	Наименьший объем выборки, необходимый, чтобы выполнить разбиение узла дерева решений	2
min_samples_leaf	Наименьший объем выборки для формирования листа дерева решений	1
max_features	Количество характеристик, которые необходимо учитывать при поиске лучшего разбиения узла; когда “sqrt”, то $\max_features = \sqrt{n_features}$	“sqrt”
bootstrap	Указывает о необходимости разбиения исходной выборки на несколько случайных подвыборок для обучения деревьев решений	True
random_state	Фиксированное значение случайной компоненты	12

Для первого метода в результате работы моделей максимальная точность, которую смогли достичь в процессе обучения, составляла 0,531.

2. *Второй метод.* В связи с недостаточной точностью, полученной моделями, которые работают со статическими данными, авторы решили использовать модели машинного обучения, которые работают непосредственно с временными рядами.

Помимо полученных при замерах координат маркеров дополнительно были вычислены следующие характеристики для каждой единицы времени измерения:

- векторные скорости в проекциях на оси координат маркеров относительно друг друга;
- скалярные скорости маркеров относительно друг друга;
- расстояния между парами трех маркеров.

При этом целесообразно учитывать только скорости маркера А относительно В и С относительно В. Скорости грудного маркера относительно брюшного (А и С) не имеет смысла учитывать, поскольку их движение сонаправлено.

Все вычисленные характеристики получались на основании зафиксированных координат маркеров и изменении этих координат между двумя соседними единицами времени.

Для данного метода использовались следующие классификаторы временных рядов: Catch22Classifier, RocketClassifier, CNNClassifier, FCNClassifier, MLPClassifier, а также составные модели, основанные на данных классификаторах.

На вход моделям подавались временные ряды, включающие координаты маркеров, векторные и скалярные скорости, расстояния между датчиками.

В итоге лучший результат по данному методу показал классификатор Catch22Classifier.

Catch22 – модель машинного обучения, которая использует и отмечает различные характеристики временных рядов с точки зрения их свойств, включая автокорреляцию, последовательные различия, распределения значений и выбросов, масштабирование колебаний и т. д., после чего строит оценку на основании измененных данных [15]. В таблице 2 приведены гиперпараметры для данной модели.

Таблица 2. Гиперпараметры для Catch22

Table 2. Hyperparameters for Catch22

Гиперпараметр Hyperparameter	Краткое описание Short Description	Значение Value
outline_norm	Нормализация каждой последовательности при использовании двух функций Catch22	True
n_jobs	Разделение вычислений на несколько потоков	–1
random_state	Фиксированное значение случайной компоненты	12

Для второго метода в результате работы моделей максимальная точность, которую смогли достичь в процессе обучения, составляла 0,630.

3. Третий метод. Данный метод основывается на том, что изменение расстояний между маркерами может быть приближённо представлено синусоидой. Основной идеей данного подхода является подбор таких синусоид, которые бы повторяли формы исходных графиков.

На рисунке 2 представлены график изменения расстояния между маркерами для грудного типа дыхания и график предполагаемой синусоиды. Видно, что форма синусоиды достаточно точно повторяет форму графика изменения расстояния между маркерами.

Ранее при классификации типов дыхания были замечены трудности в определении смешанного типа. Чтобы улучшить процесс, было принято решение разделить процесс определения типа дыхания на два этапа бинарной классификации.

Первый этап данного процесса должен определить, что полученные данные представляют конкретный (грудной или брюшной) или же смешанный тип дыхания, после чего на втором этапе грудной и брюшной типы дыхания могут быть различены между собой, если в этом есть необходимость. Данное решение позволяет улучшить процесс определения смешанного типа дыхания благодаря использованию специально выделенной для этого модели.

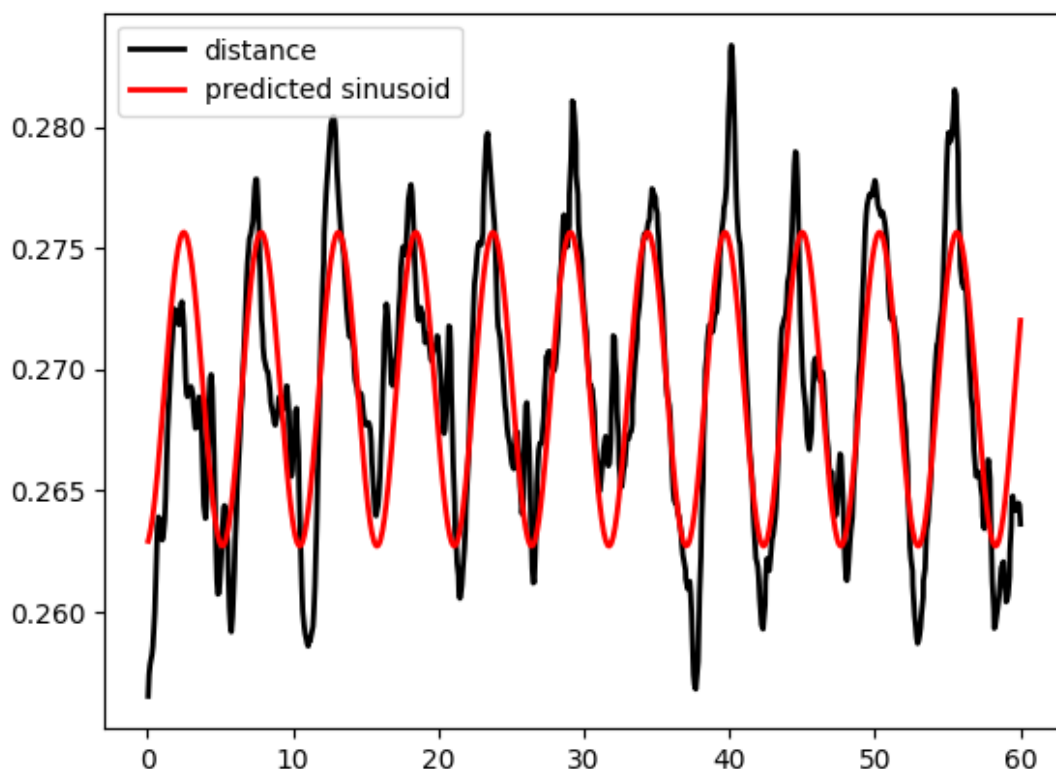


Рис. 2. Графики изменения расстояния между маркерами и предполагаемой синусоиды

Fig. 2. Graphs of the change in the distance between the markers and the assumed sinusoid

Так как был собран сравнительно небольшой датасет, то перед обучением моделей было решено разделить каждый файл на 6 частей по 10 секунд дыхания. Такого временного отрезка вполне достаточно, так как за это время человек совершает как минимум один полный цикл дыхания (вдох и выдох). Такой вывод подтверждается анализом измерений для каждого добровольца.

Были также рассмотрены варианты разбиения на 12 частей (5 секунд дыхания), на 10 частей (6 секунд дыхания), на 5 частей (12 секунд дыхания), на 4 части (15 секунд дыхания), на 3 части (20 секунд дыхания) и на 2 части (30 секунд дыхания). Однако при использовании записей такой длины качество обучения модели было значительно хуже, чем при разбиении на 6 частей. Данный факт отражен на рисунке 3.

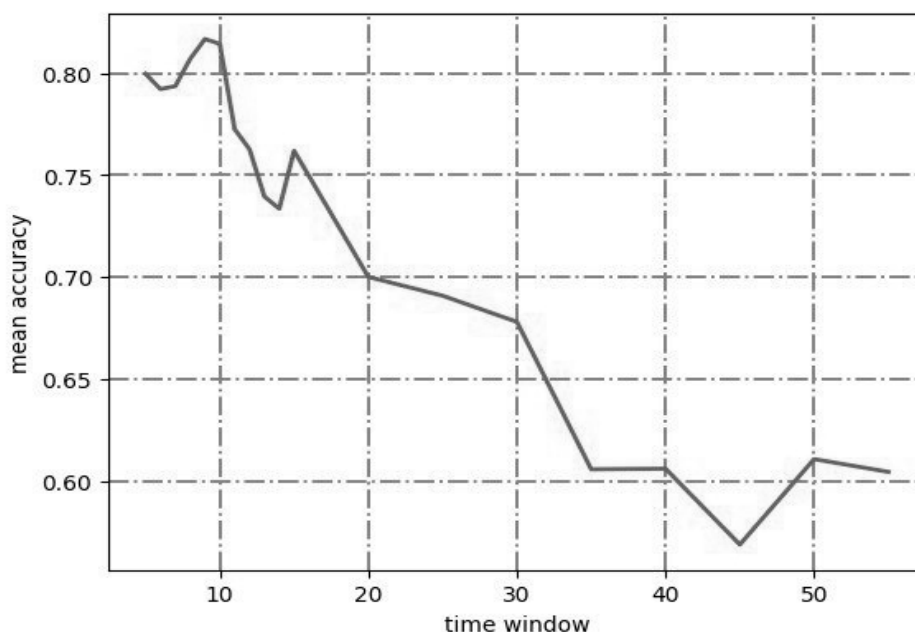


Рис. 3. График зависимости средней точности от продолжительности одной части

Fig. 3. Graph of the dependence of the average accuracy on the duration of one part

На рисунке 4 представлен общий алгоритм данного метода. Он состоит из измерения дыхания человека в течение 10 секунд в стоячем положении в привычном темпе. Затем по измеренным данным находится расстояние попарно между маркерами (грудным и брюшным, грудным и спинным, брюшным и спинным) на протяжении всего замера. Далее вычисленные изменения расстояний необходимо сгладить с помощью

фильтра Савицкого-Голея для исключения шумов. Затем необходимо вычислить предполагаемые параметры синусоиды для каждого расстояния. После этого подобрать параметры каждой синусоиды с помощью нелинейного метода наименьших квадратов [16], используя предлагаемые параметры в качестве начальных значений. Далее полученные параметры передаются на вход составной модели, которая и определяет тип дыхания.



Рис. 4. Общий алгоритм определения типа дыхания с помощью подбора синусоиды

Fig. 4. A general algorithm for determining the type of breathing by selecting a sinusoid

На рисунке 5 приведен алгоритм вычисления предполагаемых параметров одной синусоиды. Для начала необходимо задать уравнение синусоиды:

$$y = \sin(\omega t + \varphi) + c,$$

где A – растяжение графика по оси Oy (амплитуда); ω – растяжение графика по оси Ox (циклическая частота); φ – сдвиг графика по оси Ox ; c – смещение графика по оси Oy .

Затем нужно разложить временной ряд в частотный используя дискретное преобразование Фурье [17; 18]. После чего необходимо найти частоту, которая соответствует максимальному пику в

данном преобразовании. Если найденная частота равняется нулю, то найти второй максимальный пик преобразования Фурье, так как пик в нулевой частоте связан со смещением преобразования Фурье. По найденной частоте нужно найти амплитуду $A = \sqrt{2}\sigma$, где σ – стандартное отклонение всех изменений расстояния между двумя маркерами. Далее нужно вычислить циклическую частоту синусоиды $\omega = 2\pi f$, где f – предполагаемая частота. Затем определить сдвиг синусоиды $\varphi = \bar{D}$, где D – изменение расстояния между двумя маркерами, фаза = 0.

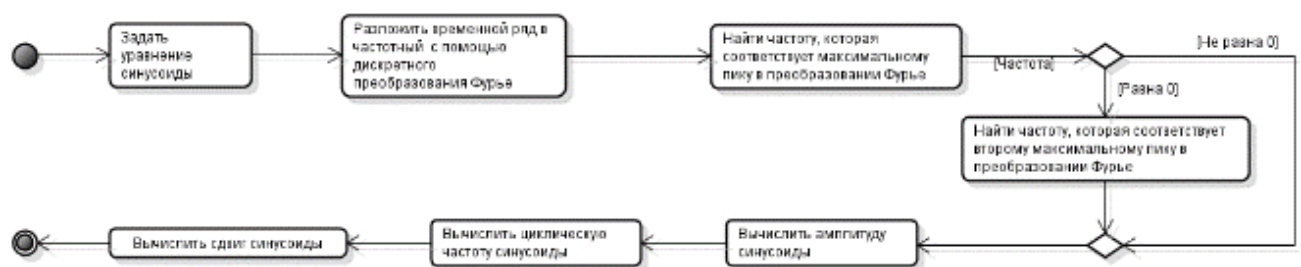


Рис. 5. Алгоритм нахождения предполагаемых параметров синусоиды

Fig. 5. Algorithm for finding the expected parameters of the sine wave

На рисунке 6 изображен алгоритм непосредственной логики работы составной модели. Полученные параметры синусоиды передаются первой части модели, которая определяет, является ли

тип дыхания смешанным. Если данная часть модели предсказала, что тип дыхания не является смешанным, то параметры синусоиды передаются второй части модели, которая определяет грудной

и брюшной тип дыхания. После этого если первая часть предсказала смешанный тип дыхания, то модель возвращает

смешанный тип дыхания, иначе результат предсказания второй части.

[Параметры синусоиды]

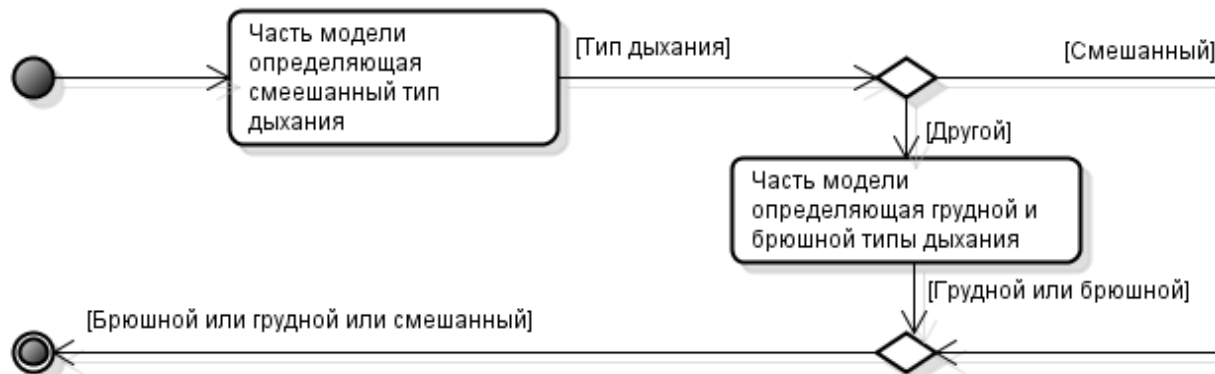


Рис. 6. Алгоритм логики работы составной модели

Fig. 6. The algorithm of the logic of the composite model

Для обучения первой и второй частей модели был выбран классификатор Hist Gradient Boosting Classifier. Hist Gradient Boosting Classifier – это модель, использующая градиентный бустинг. Градиентный бустинг использует деревья решений как базовый алгоритм. Основной идеей алгоритма является последовательное применение предсказателя таким образом, что каждая последующая модель сводит ошибку предыдущей к минимуму [19; 20].

Также для сравнения было проведено обучение модели с использованием данного классификатора, но с целью выявления всех трех типов дыхания сразу. Препроцессинг данных аналогичен препроцессингу составной модели, так же как и параметры, передаваемые в модель, и ее гиперпараметры. Гиперпараметры для классификаторов описаны в таблице 3.

Таблица 3. Гиперпараметры для компонент HistGradientBoosting составной модели

Table 3. Hyperparameters for the HistGradientBoosting component of the composite model

Гиперпараметр Hyperparameter	Краткое описание Short Description	Значение Value
max_depth	Максимальная глубина деревьев решений	15
random_state	Установка фиксированного состояния случайной составляющей	15
learning_rate	Скорость обучения	1
loss	Функция потерь, которую модель минимизирует в процессе бустинга	“log_loss”

В результате обучения составная модель показала следующие результаты: точность модели, которая определяет смешанный тип дыхания, – 0,76; модели, которая определяет грудной и брюшной, – 0,86; составной модели, определяющей сразу три типа дыхания, – 0,81.

Результаты и их обсуждение

Для оценки полученного результата были выбраны следующие числовые метрики: accuracy score, recall, precision и F1-score. Для иллюстрации результатов предсказаний моделей в качестве метрики использовались матрицы ошибок (confusion matrix), набор кривых Receiver Operating Characteristic (ROC) и

соответствующие им площади под графиками для численной интерпретации метрики.

Данные метрики можно применять как для сбалансированных, так и для несбалансированных данных. Но необходимым условием является возможность определения моделями вероятности предсказания того или иного класса.

На рисунке 7 изображена столбчатая диаграмма соотношения классов в тестовой выборке. Данная диаграмма говорит о сбалансированности классов в тестовой выборке. В связи с этим мы имеем право использовать все из вышеперечисленных метрик.

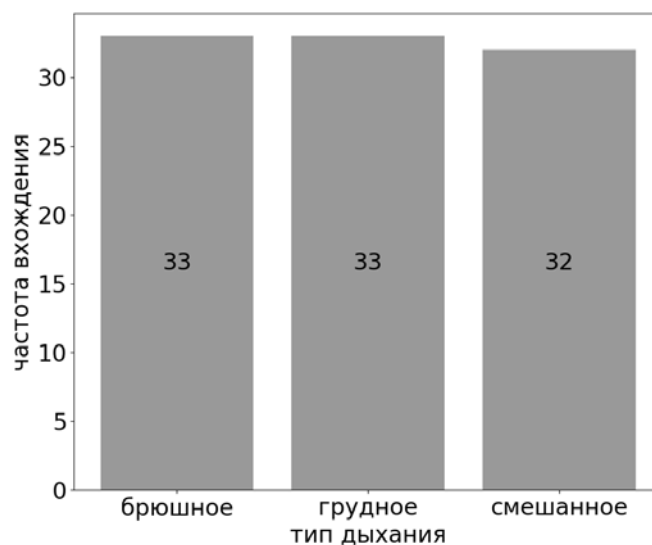


Рис. 7. Соотношение классов в тестовой выборке

Fig. 7. The ratio of classes in the test sample

Поскольку наши модели представляют собой многоклассовые классификаторы (определяют один из трех типов дыхания), для построения ROC-кривых использовался принцип One-vs-Rest [13], который заключается в том, что каждый класс по очереди рассматривается как положительный, а остальные

классы – как отрицательный. На каждом графике для сравнения присутствует диагональная линия, которая соответствует случайному выбору.

На рисунке 8 приведен набор ROC-кривых, а также матрица ошибок (confusion matrix) для модели RandomForestClassifier.

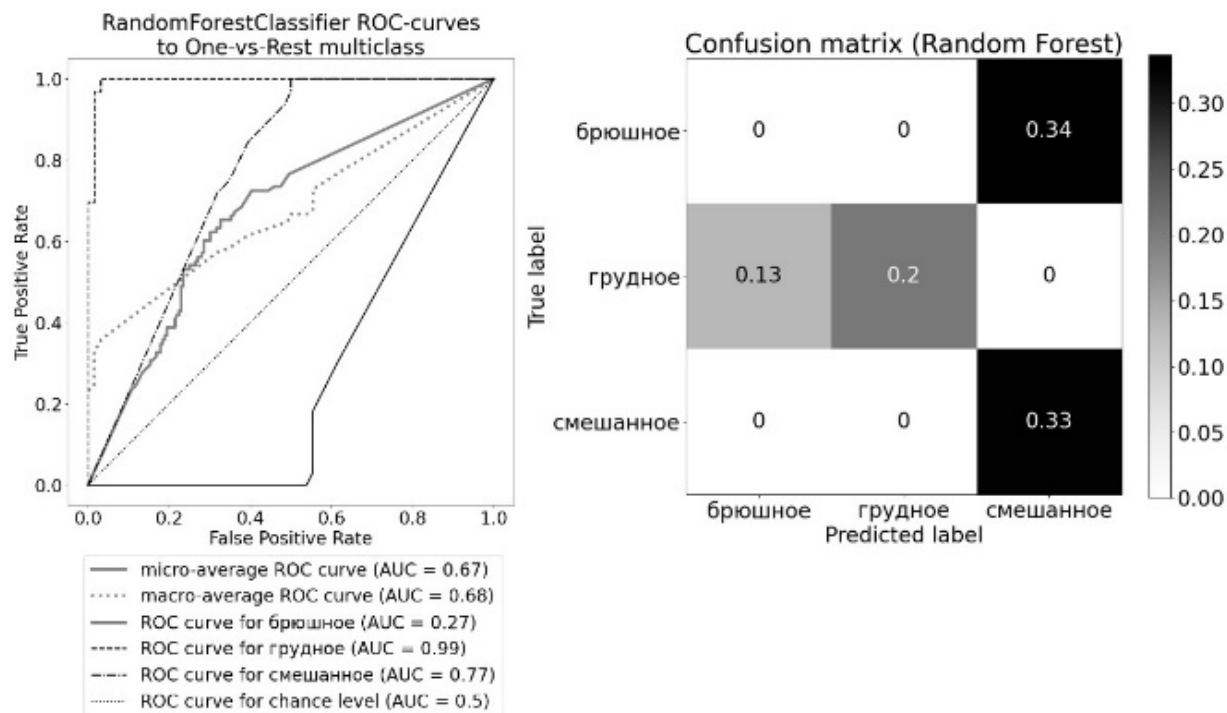


Рис. 8. Набор ROC-кривых и матрица ошибок для RandomForestClassifier

Fig. 8. A set of ROC curves and an error matrix for RandomForestClassifier

На рисунке 9 приведен набор ROC-кривых, а также матрица ошибок

(confusion matrix) для модели Catch22Classifier.

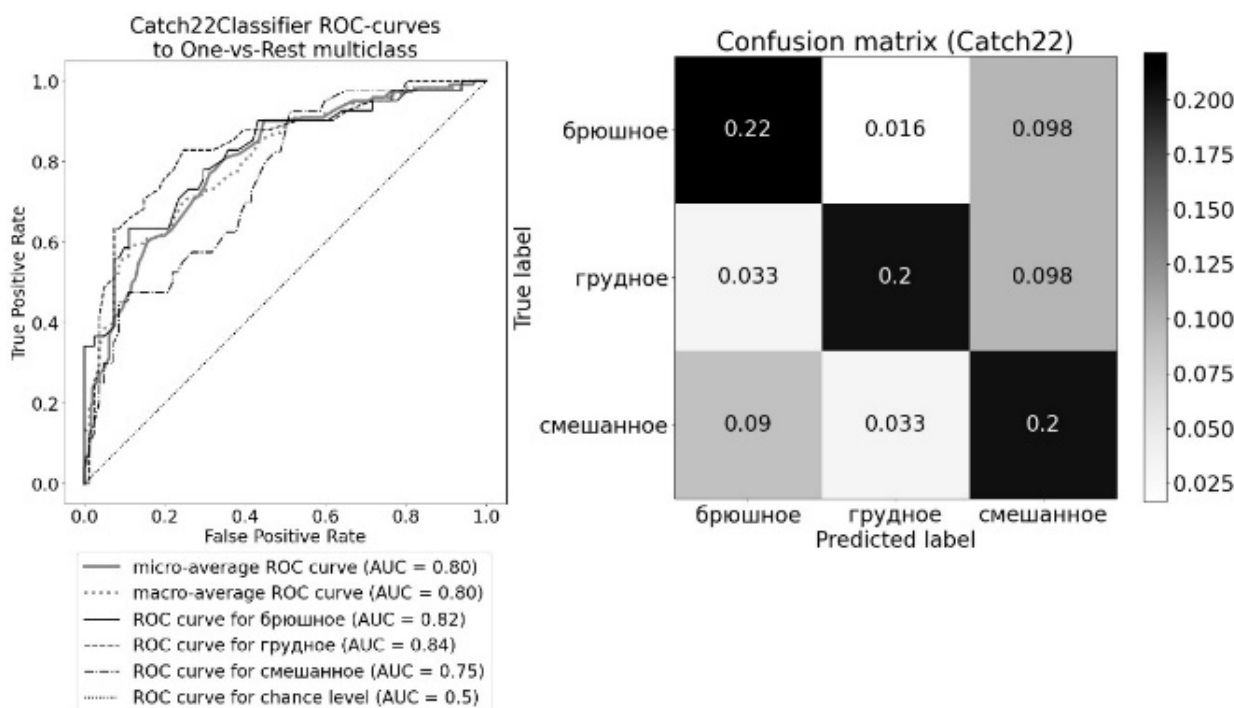


Рис. 9. Набор ROC-кривых и матрица ошибок для Catch22Classifier

Fig. 9. Set of ROC curves and error matrix for Catch22Classifier

На рисунках 10 изображены набор ROC-кривых и матрица ошибок для составной модели HistGradientBoosting. На

рисунке 10 представлен общий набор для всей составной модели HistGradientBoosting.

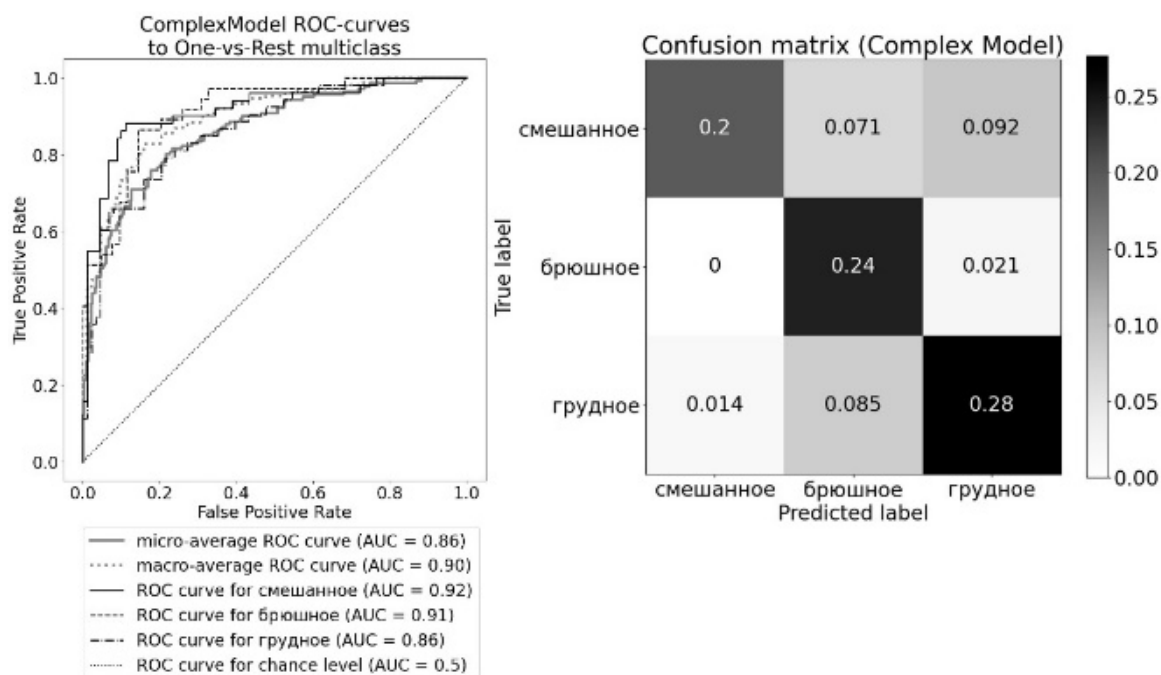


Рис. 10. Набор ROC-кривых и матрица ошибок для составной модели HistGradientBoosting

Fig. 10. A set of ROC curves and an error matrix for a composite model HistGradientBoosting

На рисунке 11 представлена ROC-кривая и матрица ошибок для первой

компоненты составной модели HistGradientBoosting.

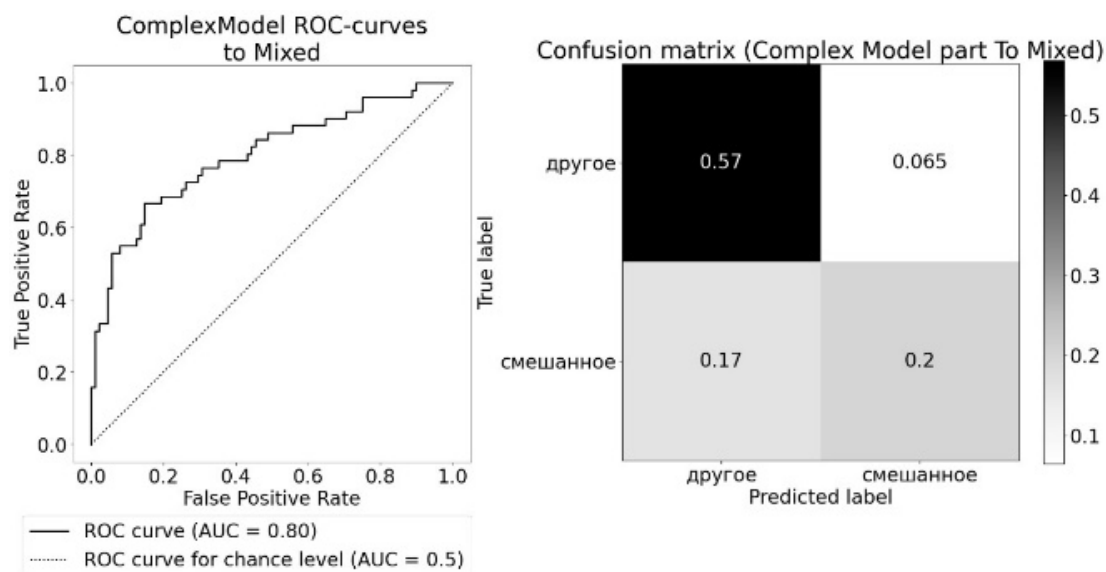


Рис. 11. ROC-кривая и матрица ошибок для первой компоненты составной модели HistGradientBoosting

Fig. 11. ROC curve and error matrix for the first component of the composite model HistGradientBoosting

На рисунке 12 представлена ROC-кривая и матрица ошибок для второй

компоненты составной модели. В таблице 4 приведены значения метрик.

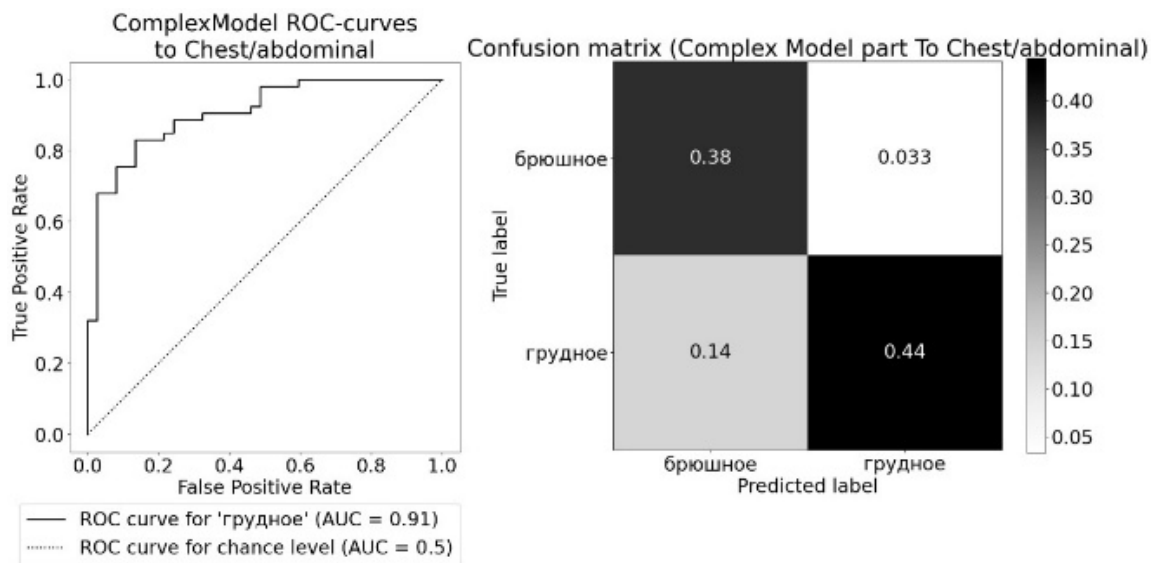


Рис. 12. ROC-кривая и матрица для второй компоненты составной модели HistGradientBoosting

Fig. 12. ROC curve and matrix for the second component of the composite model HistGradientBoosting

Таблица 4. Оценка качества работы моделей

Table 4. Evaluation of the quality of the modelsB

Модель Model	Accuracy Score	Recall	Precision	F1-score
Random Forest Classifier	0,53	0,54	0,5	0,47
Catch22 Classifier	0,63	0,63	0,65	0,64
Составная модель HistGradientBoosting	0,81	0,82	0,83	0,82

Главными метриками для оценки качества моделей были выбраны accuracy score и recall, а также ROC-кривые. ROC-кривые позволили оценить результаты работы моделей с точки зрения отдельных классов, а также увидеть соотношение истинно положительных и ложноположительных результатов. Так, из графика ROC-кривых для метода, использующего Random Forest,

видно, что она неправильно предсказывает брюшной тип дыхания и сами кривые находятся разрозненно. Для модели, использующей Catch22, из графика ROC-кривых видно, что она предсказывает любой из трех типов дыхания гораздо лучше случайного, при том все кривые располагаются кучно. ROC-кривые составной модели также располагаются кучно, но еще сильнее прибли-

жены к прямому углу (удалены от случайных результатов), что говорит о более качественных результатах предсказания по сравнению с двумя другими моделями. Наилучший результат по всем метрикам показала составная модель HistGradientBoosting.

В ходе исследования были разработаны три метода определения типа дыхания на базе машинного обучения и технологий захвата движения.

В первом методе были использованы статические характеристики, на основе которых проводилось обучение моделей Catch22Classifier, RocketClassifier, CNNClassifier, FCNClassifier, MLPClassifier.

Для первого метода в результате работы моделей максимальная точность была достигнута моделью Random Forest (точность (accuracy score) составляла 0,531).

Во втором подходе использовались модели машинного обучения, которые работают непосредственно с временными рядами. Для второго метода в результате работы моделей максимальная точность была достигнута моделью Catch22Classifier (точность (accuracy score) составляла 0,630).

Третий метод основывался на том, что изменение расстояний между датчиками может быть приближённо представлено синусоидой. Основной идеей данного подхода является подбор таких синусоид, которые бы повторяли формы исходных графиков.

В результате обучения составная модель HistGradientBoosting показала следующие результаты: точность модели, которая определяет смешанный тип дыхания, – 0,76; модели, которая определяет грудной и брюшной, – 0,86; составной модели, определяющей сразу три типа дыхания, – 0,81.

Исследования, касающиеся определения типа человеческого дыхания, имеют довольно широкий спектр целей – от диагностики заболеваний по дыханию человека до измерения частоты дыхания и подсчета количества вдохов в минуту.

Многие исследования, проводившиеся в этой области, были посвящены определению наличия дыхания или определяли всего один тип, что является малоинформативным в разрезе медицинской реабилитации. И хотя Alikhani L. и др. [9], Gong Y. и соавт. [10], Adib F. и др. [11] были достигнуты отличные результаты с точностью, превышающей 85%, данные исследования довольно ограничены в сфере применения.

В то же время Hai Anh Tran [12] возможность упрощенного проведения спирометрического анализа с помощью устройства под управлением Android имела отличные результаты – средняя ошибка составила 8%, однако в данном исследовании было относительно небольшое число испытуемых, что является довольно маленькой выборкой.

Необходимо также отметить, что, согласно [21], разработанные в данном

исследовании методы использует датчики, стоимость которых значительно ниже, чем у конкурирующих методов. Разница может варьироваться в 10–15 раз, что является значительным аргументом в пользу разработанных методов.

Еще одним преимуществом предлагаемого метода является требуемый минимум свободного пространства: для предлагаемой системы требуется всего 3 квадратных метра, в то время как для других систем захвата движения требуется не менее 10–20 квадратных метров, хотя это ограничивает объем анализируемых данных и, следовательно, точность модели, ее можно использовать в домашних условиях, что важно для реабилитации.

Выводы

В заключение можно сделать вывод, что определять тип дыхания с помощью используемой системы захвата и методов машинного обучения возможно, при этом достигая показателей точности

(метрик), имеющих значения гораздо выше случайного предсказания (для которого при трех классах, например, точность (accuracy score) равняется 0,33). Так лучший результат показала составная модель из третьего подхода (accuracy score, равным 0,81). Это говорит о том, что результаты моделей можно считать как минимум удовлетворительными.

Команда авторов планирует в дальнейшем увеличить набор данных и изучить возможность использования методов по комбинированию моделей машинного обучения. Данные планируется увеличивать за счет как минимум двух факторов: увеличения числа замеров (привлечение новых добровольцев), применения методов размножения данных, например, модификации уже собранных данных за счет поворота измеренных координат в пространстве на случайный угол (равный для всех трех маркеров) или добавления случайного смещения (равное для всех трех маркеров).

Список литературы

1. Разработка метода определения доминирующего типа дыхания человека на базе технологий компьютерного зрения, системы захвата движения и машинного обучения / А. В. Зубков, А. Р. Донская, С. Н. Бушенева, Ю. А. Орлова, Г. М. Рыбчиц // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2022. № 10(4). С. 15. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.39.4.016>.
2. Васильев В. И. Влияние диафрагмально-релаксационного типа дыхания на здоровье учащихся средней общеобразовательной школы // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В. Г. Белинского. 2006. № 5. С. 121–123.
3. Subin S., Pravin A. Breathing techniques-A review – 25 different types // International Journal of Physical Education, Sports and Health. 2015. N 2(2). P. 237–241.

4. Разработка автоматизированной системы мониторинга антигенов коронавирусной инфекции на основе иммунохроматографического анализа / С. Н. Костарев, Р. А. Файзрахманов, О. В. Новикова, О. В. Комягина, Т. Г. Серeda // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. № 12(3). С. 8–27. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-8-27>.
5. Разработка системы автоматического диагноза на наличие антител иммуноглобулинов IgG и IgM SARS-CoV-2 / С. Н. Костарев, О. В. Кочетова, Н. А. Татарникова, Т. Г. Серeda // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. № 11(2). С. 8–24.
6. Exploring Automatic Diagnosis of COVID-19 from Crowdsourced Respiratory Sound Data / Ch. Brown, J. Chauhan, A. Grammenos, J. Han, A. Hasthanasombat, D. Spathis, T. Xia, P. Cicuta, C. Mascolo // KDD '20: Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. Association for Computing Machinery, 2020. P. 3474–3484.
7. Exploring Automatic Diagnosis of COVID-19 from Crowdsourced Respiratory Sound Data / B. Avuthu, N. Yenuganti, S. Kasikala, A. Viswanath // IC3-2022: Proceedings of the 2022 Fourteenth International Conference on Contemporary Computing, 2022. P. 367–371. <https://doi.org/10.1145/3549206.3549272>.
8. Schoun B., Transue Sh., Min-Hyung Choi. Real-time Thermal Medium-based Breathing Analysis with Python // PyHPC'17: Proceedings of the 7th Workshop on Python for High Performance and Scientific Computing November. New York: Association for Computing, 2017. Is. 5. P. 1–9. <https://doi.org/10.1145/3149869.3149874>.
9. Spectral fusion-based breathing frequency estimation; experiment on activities of daily living / I. Alikhani, K. Noponen, A. Hautala [et al.] // BioMed Eng OnLine. 2019. N 17. P. 99. <https://doi.org/10.1186/s12938-018-0533-1>.
10. BreathMentor: Acoustic-based Diaphragmatic Breathing Monitor System / Gong Y., Zhang Q., Bobby H. P. NG, Li W // Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies. Association for Computing Machinery, 2022. P. 1–28. <https://doi.org/10.1145/3534595>.
11. Smart Homes that Monitor Breathing and Heart Rate / F. Adib, H. Mao, Z. Kabelac, D. Katabi, R. C. Miller // CHI '15: Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems. Seoul, 2015. P. 837–846. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702200>.
12. Hai Anh Tran, Quynh Thu Ngo, Huy Hoang Pham. An application for diagnosing lung diseases on Android phone // SoICT '15: Proceedings of the 6th International Symposium on Information and Communication Technology. Association for Computing Machinery, 2015. P. 328–334. <https://doi.org/10.1145/2833258.2833289>.

13. Machine Learning: A First Course for Engineers and Scientists / A. Lindholm, N. Wahlström, F. Lindsten, T. Schön. Cambridge University Press, 2022.
14. Accuracy and diversity-aware multi-objective approach for random forest construction / El I. K. Nour, A. K. Abdelaziz, A. Ali, S. Hassina, A. Sabeur, D. Wajdi // Expert Systems with Applications. 2023. N 225. P. 20138. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120138>.
15. Catch22: Canonical Time-series Characteristics / C. H. Lubba, S. S. Sethi, P. Knaute [et al.] // Data Min Knowl Disc. 2019. N 33. P. 1821–1852. <https://doi.org/10.1007/s10618-019-00647-x>.
16. Charnes A., Frome E. L., Yu P. L. The Equivalence of Generalized Least Squares and Maximum Likelihood Estimates in the Exponential Family // J. Am. Stat. Assoc. 1976. N 71. P. 169–171.
17. Классификация функционального состояния системы дыхания на основе анализа вариабельности медленных волн VLF-диапазона / А. В. Киселев, А. А. Кузьмин, М. Б. Мяснянкин, А. А. Маслак, С. А. Филист, А. Ф. Рыбочкин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. № 12(1). С. 8–32. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-8-32>.
18. Li C. Discrete Fourier Transform and Fast Fourier Transform // Time Series Data Analysis in Oceanography. Cambridge University Press, 2022. P. 242–266. <https://doi.org/10.1017/9781108697101.015>.
19. Pirayonesi S. M., El-Diraby T. E. Data Analytics in Asset Management: Cost-Effective Prediction of the Pavement Condition Index // Journal of Infrastructure Systems. 2020. N 26(1). P. 1–25. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000512](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000512).
20. Method for Determining the Dominant Type of Human Breathing Using Motion Capture and Machine Learning / Y. Orlova, A. Gorobtsov, O. Sychev, V. Rozaliev, A. Zubkov, A. Donskaia // Algorithms. 2023. N 16(5). P. 249. <https://doi.org/10.3390/a16050249>.
21. Analysis of breathing via optoelectronic systems: Comparison of four methods for computing breathing volumes and thoraco-abdominal motion pattern / C. Massaroni, G. Senesi, E. Schena, S. Silvestri // Comput. Methods Biomech. Biomed. 2017. N 20. P. 1678–1689.

References

1. Zubkov A. V., Donskaia A. R., Busheneva S. N., Orlova Yu. A., Rybchic G. M. Razrabotka metoda opredeleniya dominiruyushchego tipa dykhaniya cheloveka na baze tekhnologii komp'yuternogo zreniya, sistemy zakhvata dvizheniya i mashinnogo obucheniya [Development of a method for determining the dominant type of human respiration based on computer vision technologies, motion capture systems and machine learning]. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tehnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*, 2022, vol. 10, no. 4, p. 15. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.39.4.016>.

2. Vasil'ev V. I. Vliyanie diafragmal'no-relaksatsionnogo tipa dykhaniya na zdorov'e uchashchikhsya srednei obshcheobrazovatel'noi shkoly [Influence of diaphragmatic relaxation type of breathing on the health of secondary school students]. *Izvestija Penzenskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. V. G. Belinskogo = Proceedings of the Penza State Pedagogical University named after V. G. Belinsky*, 2006, no. 5, pp. 121–123.

3. Subin S., Pravin A. Breathing techniques-A review – 25 different types. *International Journal of Physical Education, Sports and Health*, 2015, no. 2(2), pp. 237–241.

4. Kostarev S. N., Fajzrahmanov R. A., Novikova O. V., Komjagina O. V., Sereda T. G. Razrabotka avtomatizirovannoi sistemy monitoringa antigenov koronavi-rusnoi infektsii na osnove immunokhromatograficheskogo analiza [Development of an automated system for monitoring coronavirus infection antigens based on immunochromatographic analysis]. *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2022, no. 12(3), pp. 8–27. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-3-8-27>

5. Kostarev S. N., Kochetova O. V., Tatarnikova N. A., Sereda T. G. Razrabotka sistemy avtomaticheskogo diagnoza na nalichie antitel immu-noglobulinov IgG i IgM SARS-CoV-2 [Development of an automatic diagnosis system for the presence of IgG and IgM immunoglobulin antibodies SARS-CoV-2]. *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, no. 11(2), pp. 8–24.

6. Brown Ch., Chauhan J., Grammenos A., Han J., Hasthanasombat A., Spathis D., Xia T., Cicuta P., Mascolo C. Exploring Automatic Diagnosis of COVID-19 from Crowdsourced Respiratory Sound Data. *KDD '20: Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. Association for Computing Machinery, 2020, pp. 3474–3484.

7. Avuthu B., Yenuganti N., Kasikala S., Viswanath A. Exploring Automatic Diagnosis of COVID-19 from Crowdsourced Respiratory Sound Data. *IC3-2022: Proceedings of the 2022 Fourteenth International Conference on Contemporary Computing*, 2022, pp. 367–371. <https://doi.org/10.1145/3549206.3549272>

8. Schoun B., Transue Sh., Min-Hyung Choi. Real-time Thermal Medium-based Breathing Analysis with Python. *PyHPC'17: Proceedings of the 7th Workshop on Python for High Performance and Scientific Computing November*. New York, Association for Computing Publ., 2017, is. 5, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1145/3149869.3149874>

9. Alikhani I., Noponen K., Hautala A., eds. Spectral fusion-based breathing frequency estimation; experiment on activities of daily living. *BioMed Eng OnLine*, 2019, no. 17, p. 99. <https://doi.org/10.1186/s12938-018-0533-1>

10. Gong Y., Zhang Q., Bobby H. P. NG, Li W. BreathMentor: Acoustic-based Diaphragmatic Breathing Monitor System. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable*

and Ubiquitous Technologies. Association for Computing Machinery Publ., 2022, pp. 1–28. <https://doi.org/10.1145/3534595>

11. Adib F., Mao H., Kabelac Z., Katabi D., Miller R. C. Smart Homes that Monitor Breathing and Heart Rate. CHI '15: Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems. Seoul, 2015, pp. 837–846. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702200>

12. Hai Anh Tran, Quynh Thu Ngo, Huy Hoang Pham. An application for diagnosing lung diseases on Android phone. SoICT '15: Proceedings of the 6th International Symposium on Information and Communication Technology. Association for Computing Machinery Publ., 2015, pp. 328–334. <https://doi.org/10.1145/2833258.2833289>.

13. Lindholm A., Wahlström N., Lindsten F., Schön T. B. Machine Learning: A First Course for Engineers and Scientists. Cambridge University Press, 2022.

14. Nour El I. K., Abdelaziz A. K., Ali A., Hassina S., Sabeur A., Wajdi D. Accuracy and diversity-aware multi-objective approach for random forest construction. *Expert Systems with Applications*, 2023, no. 225, p. 20138. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120138>.

15. Lubba C. H., Sethi S. S., Knaute P., eds. Catch22: Canonical Time-series Characteristics. *Data Min Knowl Disc*, 2019, no. 33, pp. 1821–1852. <https://doi.org/10.1007/s10618-019-00647-x>

16. Charnes A., Frome E. L., Yu P. L. The Equivalence of Generalized Least Squares and Maximum Likelihood Estimates in the Exponential Family. *J. Am. Stat. Assoc.*, 1976, no. 71, pp. 169–171.

17. Kiselev A. V., Kuz'min A. A., Mjasnjankin M. B., Maslak A. A., Filist S. A., Rybochkin A. F. Klassifikatsiya funktsional'nogo sostoyaniya sistemy dykhaniya na osnove analiza variabel'nosti medlennykh voln VLF-diapazona [Classification of the functional state of the respiratory system based on the analysis of the variability of slow VLF waves]. *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2022, no. 12(1), pp. 8–32. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-1-8-32>

18. Li C. Discrete Fourier Transform and Fast Fourier Transform. In *Time Series Data Analysis in Oceanography*. Cambridge University Press Publ., 2022, pp. 242–266. <https://doi.org/10.1017/9781108697101.015>

19. Pirayonesi S. M., El-Diraby T. E. Data Analytics in Asset Management: Cost-Effective Prediction of the Pavement Condition Index. *Journal of Infrastructure Systems*, 2020, no. 26(1), pp. 1–25. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000512](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000512)

20. Orlova Y., Gorobtsov A., Sychev O., Rozaliev V., Zubkov A., Donsckaia A. Method for Determining the Dominant Type of Human Breathing Using Motion Capture and Machine Learning. *Algorithms*, 2023, no. 16(5), p. 249. <https://doi.org/10.3390/a16050249>

21. Massaroni C., Senesi G., Schena E., Silvestri S. Analysis of breathing via optoelectronic systems: Comparison of four methods for computing breathing volumes and thoraco-abdominal motion pattern. *Comput. Methods Biomech. Biomed*, 2017, no. 20, pp. 1678–1689.

Информация об авторах / Information about the Authors

Зубков Александр Владимирович, аспирант, Волгоградский технический государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация, e-mail: zubkov.alexander.v@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0425-5695

Alexander V. Zubkov, Post-Graduate Student, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, e-mail: zubkov.alexander.v@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0425-5695

Донская Анастасия Романовна, аспирант, Волгоградский технический государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация, e-mail: donsckaia.anastasiya@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-3086-4929

Anastasia R. Donsckaia, Post-Graduate Student, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, e-mail: donsckaia.anastasiya@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-3086-4929

Маренков Ярослав Анатольевич, студент кафедры программного обеспечения автоматизированных систем, Волгоградский технический государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация, e-mail: yaroslavmarenkov5@gmail.com

Yaroslav A. Marenkov, Student of the Department of Software of Automated Systems, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, e-mail: yaroslavmarenkov5@gmail.com

Болгов Дмитрий Александрович, студент кафедры программного обеспечения автоматизированных систем, Волгоградский технический государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация, e-mail: dima-bolgov.02@mail.ru

Dmitry A. Bolgov, Student of the Department of Software of Automated Systems, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, e-mail: dima-bolgov.02@mail.ru

Гомазкова Юлия Сергеевна, студент кафедры программного обеспечения автоматизированных систем, Волгоградский технический государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация, e-mail: gomazkova19@yandex.ru

Yulia S. Gomazkova, Student of the Department of Software of Automated Systems, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, e-mail: gomazkova19@yandex.ru

Оценка дальности передачи видеoinформации различного качества при мониторинге чрезвычайных ситуаций с беспилотного летательного аппарата

М. Ю. Алемпьев¹, Д. С. Коптев¹ ✉, В. Г. Довбня¹,
Е. В. Скрипкина²

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

² Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А. А. Леонова
ул. Гагарина, д. 42, Московская область, г. Королев 141074, Российская Федерация

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Резюме

Целью исследования является оценка максимальной дальности передачи видеoinформации различного качества с беспилотного летательного аппарата для прогнозирования его возможностей при мониторинге чрезвычайной ситуации.

Методы исследования основаны на понятиях теории радиоэлектроники, теории диагностики и прогностики технического состояния беспилотных летательных аппаратов. Используются методы многокритериального анализа, параметрического и структурного синтеза. Проанализированы принципы передачи видеoinформации с беспилотных летательных аппаратов, используемых для мониторинга чрезвычайных ситуаций. Произведена критическая оценка максимальной дальности передачи видеoinформации с беспилотных летательных аппаратов при мониторинге чрезвычайных ситуаций.

Результаты. Получены графики зависимости энергетического запаса в линии радиосвязи между беспилотным летательным аппаратом и наземным комплексом управления, позволяющие оценить максимальные значения дальности передачи видеoinформации различного качества в диапазонах 2,4 и 5,8 ГГц при мониторинге чрезвычайных ситуаций. Максимальная дальность прямой видимости между БПЛА и НКУ слабо зависит от высоты подъема антенны мобильного НКУ и при высоте подъема БПЛА от 100 до 500 м составляет от 40 до 85 км. Максимальная дальность организации передачи видеoinформации HD качества с БПЛА методом ФМ-4 с использованием турбокодирования Turbo 7/8 в диапазонах 2,4 и 5,8 ГГц составляет 3 и 7 км соответственно, а при передаче видеoinформации FHD качества с БПЛА методом КАМ-16 с использованием турбокодирования Turbo 7/8 в диапазонах 2,4 и 5,8 ГГц составляет 1,4 и 3,3 км.

Заключение. Развитие метода определения максимальной дальности передачи видео- и командо-телеметрической информации позволяет более точно оценить энергетический запас в линии радиосвязи с беспилотным летательным аппаратом. В качестве перспективных направлений исследований в области использования беспилотных летательных аппаратов при чрезвычайных ситуациях следует рассматривать беспилотные летательные аппараты для пеленгации и обнаружения спасательных радиомаяков пострадавших при проведении поисково-спасательных операций.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; наземный комплекс управления; дальность связи; линия радиосвязи; вид модуляции; турбокодирование.

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

Для цитирования: Оценка дальности передачи видеoinформации различного качества при мониторинге чрезвычайных ситуаций с беспилотного летательного аппарата / М. Ю. Алемпьев, Д. С. Коптев, В. Г. Довбня, Е. В. Скрипкина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 31–44. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-31-44>.

Поступила в редакцию 29.03.2023

Подписана в печать 20.04.2023

Опубликована 30.06.2023

Evaluation of the Transmission Range of Videoinformation of Various Quality when Monitoring Emergency Situations from an Unmanned Aerial Vehicle

Mikhail Y. Alempiev¹, Dmitry S. Koptev¹ ✉,
Vitaly G. Dovbnya¹, Elena V. Skripkina²

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

² Leonov University of Technology
42 Gagarin Str., Moscow Region, Korolev 141070, Russian Federation

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Abstract

The purpose of research The aim of the study is to estimate the maximum transmission range of video information of various quality from an unmanned aerial vehicle to predict its capabilities when monitoring an emergency situation.

Methods. Research methods are based on the concepts of the theory of radio electronics, the theory of diagnostics and prognostics of the technical condition of unmanned aerial vehicles. The methods of multicriteria analysis, parametric and structural synthesis were used. The principles of transmitting video information from unmanned aerial vehicles used to monitor emergency situations are analyzed. A critical assessment of the maximum transmission range of video information from unmanned aerial vehicles during emergency monitoring has been made.

Results. Graphs of the dependence of the energy reserve in the radio communication line between the unmanned aerial vehicle and the ground control system have been obtained, allowing to estimate the maximum values of the transmission range of video information of various quality in the 2.4 and 5.8 GHz bands when monitoring emergencies. The maximum line-of-sight range between the UAV and the UAV slightly depends on the lifting height of the antenna

of the mobile UAV and at the lifting height of the UAV from 100 to 500 m is from 40 to 85 km. The maximum range of HD quality video transmission with the FM-4 UAV using Turbo 7/8 turbocoding in the 2.4 and 5.8 GHz bands is 3 and 7 km, respectively, and when transmitting FHD quality video information with the CAM-16 UAV using Turbo 7/8 turbocoding in the 2.4 and 5.8 GHz bands is 1.4 and 3.3 km.

Conclusion. The development of a method for determining the maximum transmission distance of video and command-telemetry information allows for a more accurate assessment of the energy reserve in the radio communication line with an unmanned aerial vehicle. Unmanned aerial vehicles for direction finding and detection of rescue beacons of victims during search and rescue operations should be considered as promising areas of research in the field of the use of unmanned aerial vehicles in emergency situations.

Keywords: unmanned aerial vehicle; ground control system; communication range; radio communication line; type of modulation; turbo coding.

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

For citation: Alempiev M. Y., Koptev D. S., Dovbnya V. G., Skripkina E. V. Evaluation of the Transmission Range of Video Information of Various Quality when Monitoring Emergency Situations from an Unmanned Aerial Vehicle. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(2): 31–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-31-44>.

Received 29.03.2023

Accepted 20.04.2023

Published 30.06.2023

Введение

В настоящее время для решения широкого класса задач, связанных с мониторингом чрезвычайных ситуаций, сельского хозяйства, строительства, транспорта, медицины, геодезии, картографии, журналистики и других сфер общества, нашли широкое применение беспилотные летательные аппараты (БПЛА).

В Министерстве чрезвычайных ситуаций МЧС России основными задачами применения БПЛА являются [1]:

- обнаружение чрезвычайных ситуаций (ЧС);
- участие в ликвидации ЧС;
- поиск и спасение пострадавших;
- оценка ущерба от ЧС.

По состоянию на конец 2022 г. на оснащении подразделений МЧС России находятся более 1700 единиц беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) вертолетного и 40 – самолетного типов [2]. Из них подавляющее большинство согласно универсальной классификации

Международной ассоциации по беспилотным системам AUVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International) относятся к классу микро со следующими параметрами [3]:

- взлетная масса – до 5 кг;
- дальность полета – до 10 км;
- высота полета – до 500 м;
- максимальная скорость полета – до 60 км/ч;
- продолжительность полета – до 1 ч.

Целью статьи является анализ возможностей беспилотных летательных аппаратов, а именно определение максимальной возможной дальности передачи видеoinформации различного качества при мониторинге чрезвычайных ситуаций.

Материалы и методы

Радиолиния между БПЛА и наземным комплексом управления (НКУ) состоит из командно-телеметрического (КТ) канала и канала передачи видеoinформации (ПВИ) с БПЛА.

Для связи БПЛА и НКУ в городских условиях в подавляющем большинстве случаев с целью снижения уровня помех используют диапазон 5,8 ГГц, а на открытой местности для получения большей дальности – 2,4 ГГц. При этом необходимо учитывать, что безлицензионная работа в диапазоне 2,4 ГГц разрешена только для внутриофисного оборудования, что, в свою очередь, обуславливает необходимость получения соответствующей лицензии.

Для КТ-канала современных БПЛА малого класса вертолетного типа наиболее характерным является применение помехоустойчивых и разведзащищенных режимов – режим «быстрой псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ)».

Так как к КТ-каналу предъявляются меньшие требования по скорости передачи, чем к каналу ПВИ (табл.), в данной статье рассматривается именно канал ПВИ в условиях ЧС [4; 5; 6].

Таблица. Основные параметры КТ-канала и канала ПВИ

Table. Main parameters of CT-channel and PVI channel

Наименование параметра линии радиосвязи Name of the parameter of the radio communication line	Значение параметра Parameter value	
	КТ-канал CT channel	канал ПВИ PVI channel
Вид модуляции	ЧМ _н -2, ФМ-2, OFDM	ФМ-4, КАМ-16
Максимально допустимая мощность передатчика, дБм	20	20
Скорость передачи командно-телеметрических данных, кбит/с	от 56 до 115,2	–
Максимальная скорость передачи видеoinформации, Мбит/с: FHD (1920×1080, 24/25/30 p) HD (1280×720, 24/25/30 p)	–	50 (H.265); 60 (H.264) 25 (H.265); 30 (H.264)
Вероятность битовой ошибки, не более	10 ^{–7}	10 ^{–6}

Канал связи между БПЛА и НКУ в общем случае является каналом с многолучевым распространением радиоволн (PPV), который характеризуется наличием явлений переотражения, рассеивания и рефракции, что приводит к появлению различного рода замираний сигнала. При этом максимальная дальность радиосвязи (км) между НКУ и БПЛА ограничена прямой видимостью, которая определяется следующим выражением [7; 8]:

$$R_0 = 3,57 \left(\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2} \right), \quad (1)$$

где H_1 – высота подъема антенны НКУ, м;
 H_2 – высота подъема БПЛА, м.

Антенна НКУ, как правило, является мобильной и устанавливается на высоте от 1 до 3 м (типовые значения) [9]. Графики зависимости максимальной дальности прямой видимости от высоты подъема БПЛА для типовых значений подъема антенны мобильного НКУ приведены ниже (рис.).

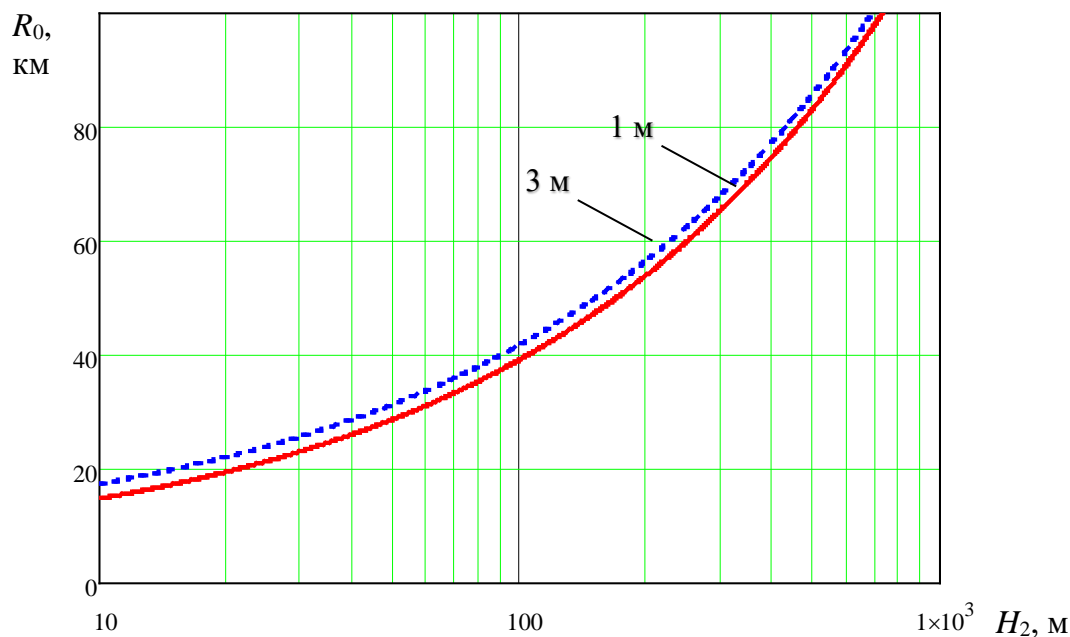


Рис. 1. Графики зависимости дальности прямой видимости от высоты подъема БПЛА для типовых значений подъема антенны НКУ

Fig. 1. Graphs of the dependence of the line-of-sight range on the height of the UAV lift for typical values of the NKU antenna lift

Как следует из графиков, приведенных на рисунке 1, максимальная дальность прямой видимости между БПЛА и НКУ слабо зависит от высоты подъема антенны мобильного НКУ и при высоте подъема БПЛА от 100 до 500 м составляет от 40 до 85 км. Поэтому на практике высоту подъема антенны НКУ выбирают, прежде всего, исходя из необходимости снижения влияния многолучевого РРВ, с учетом возможных препятствий на пути распространения сигнала [10; 11].

Поскольку мощность излучаемого сигнала ограничена значением 20 дБм, а дальность радиосвязи – прямой видимостью, целесообразно оценить максимальную дальность передачи видеоинформации различного качества с БПЛА на НКУ при мониторинге чрезвычайных ситуаций.

В качестве исходных данных для расчетов примем следующие:

- антенны БПЛА и НКУ коллинеарные с коэффициентом усиления 8 дБи в диапазонах 2,4 и 5,8 ГГц соответственно;

- передача видеоинформации HD- и FHD-качества (видеокодер H.265) осуществляется с использованием видов модуляции ФМ-4 и КАМ-16 соответственно и методов помехоустойчивого кодирования [12].

Мощность сигнала P_R на входе приемника НКУ может быть записана в виде

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R}{L}, \quad (2)$$

где P_T – мощность, подводимая к антенне передатчика, Вт; G_T, G_R – коэффициенты усиления передающей антенны БПЛА и приемной антенны НКУ соответственно; L – энергетические потери

сигнала в непрерывном канале связи ($L > 1$).

Мощность шума P_N , приведенная к входу приемника НКУ, может быть определена из следующего выражения:

$$P_N = N_0 B, \quad (3)$$

где $N_0 = kT_R$ – односторонняя спектральная плотность мощности шума, дБВт/Гц; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, Дж/К; T_R – шумовая температура приемника НКУ, К; $B = 1/T$ – ширина полосы пропускания приемника при согласованной фильтрации, Гц; T – длительность символа, с.

Шумовая температура приемника НКУ определяется, прежде всего, шумовой температурой антенны, которая равна

$$T_R \approx T_A = 290 \text{ К}. \quad (4)$$

Длительность передаваемого символа определяется выражением

$$T = r_{FEC} \log_2 M / R, \quad (5)$$

где R – информационная скорость, бит/с; M – позиционность сигнала; r_{FEC} – результирующая кодовая скорость.

Тогда с учетом выражений (2) – (5) отношение сигнал / шум, приведенное к входу приемника линии радиосвязи, можно записать в следующем виде:

$$h^2 = \frac{P_R}{P_N} = \frac{E_s T}{N_0 B} = P_T G_T G_R \frac{r_{FEC} \log_2 M}{k T_R R L}, \quad (6)$$

где P_R – мощность сигнала; $P_N = N_0 B$ – мощность шума; $E_s = P_R T$ – средняя энергия символа.

В большинстве практических случаев расчет отношения сигнал / шум

удобней производить в децибелах по следующей формуле [13; 14]:

$$h_{[дБ]}^2 = 228,6 + P_{T[дБВт]} + G_{T[дБи]} + G_{R[дБи]} - 10 \lg T_R - 10 \lg \frac{R}{r_{FEC} \log_2 M} - L_{[дБ]}. \quad (7)$$

Очевидно, что для обеспечения приема с вероятностью ошибки не более заданной P_b (10^{-6} для передачи видеoinформации) необходимо, чтобы энергетический запас в линии связи Δh^2 превышал запас на общие замирания:

$$\Delta h^2 = h^2 - h_0^2 \geq h_{fad}^2, \quad (8)$$

где h_0^2 – отношение сигнал / шум, обеспечивающее в потенциале заданную вероятность битовой ошибки (пороговое отношение сигнал / шум), дБ; h_{fad}^2 – энергетический запас в линии связи на общие замирания, дБ.

Запас на общие замирания положим равным 10 дБ, что соответствует большинству практических случаев.

Для сигналов ФМ-4 (QPSK) и КАМ-16 (QAM-16) пороговое отношение сигнал / шум составляет 13,6 и 20,6 дБ соответственно. В случае применения помехоустойчивого кодирования эта величина может быть существенно снижена. Так, например, при использовании мощных корректирующих кодов – турбокодов Turbo 7/8 ($r_{FEC} = 0,875$) пороговое отношение сигнал / шум может быть снижено до 7,3 и 14,1 дБ соответственно [15; 16].

Результаты и их обсуждение

Энергетические потери в непрерывном канале связи складываются из следующих составляющих:

$$L = L_0 + L_g + L_r + L_p + L_c, \quad (9)$$

где L_0 – энергетические потери в свободном пространстве, дБ; L_g – энергетические потери в атмосферных газах, дБ; L_r – энергетические потери в гидрометеорах, дБ; L_p – энергетические потери из-за поляризационного рассогласования антенн БПЛА и НКУ, дБ; L_c – энергетические потери, не связанные с распространением радиоволн (потери в разъёмных соединениях и фидере БПЛА и НКУ), дБ.

Энергетические потери в свободном пространстве определяются из выражения [17; 18]

$$L_0 = 10 \lg \left(\frac{4\pi \cdot 10^3 \cdot r}{\lambda} \right)^2 = 92,44 + 20 \lg r + 20 \lg f, \quad (10)$$

где r – протяженность линии связи, км; $f = 0,3/\lambda$ – несущая частота сигнала, ГГц; λ – длина волны, м.

На рисунке 2 приведены графики зависимости энергетических потерь в свободном пространстве от расстояния до БПЛА для несущих частот сигнала 2,4 и 5,8 ГГц.

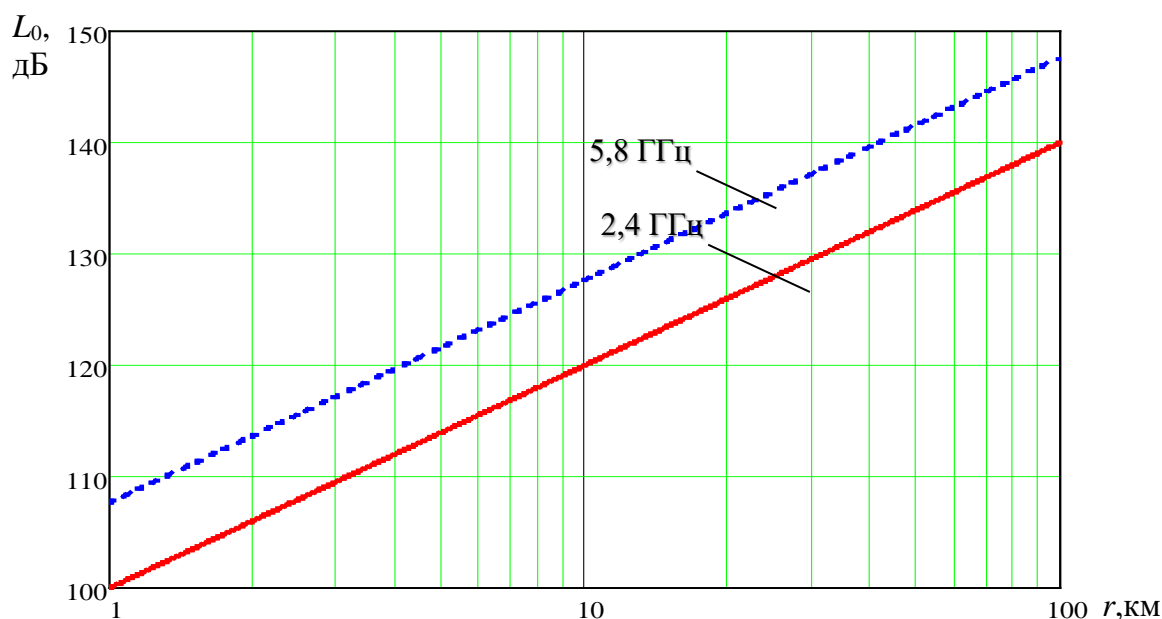


Рис. 2. Графики зависимости энергетических потерь в свободном пространстве от расстояния до БПЛА

Fig. 2. Graphs of the dependence of energy losses in free space on the distance to the UAV

Анализ графиков, приведенных на рисунке 2, показывает, что максимальные энергетические потери в свободном пространстве на расстоянии БПЛА до 10 км составляют не более 120 и 128 дБ в диапазонах 2,4 и 5,8 ГГц соответственно.

Энергетические потери из-за поляризационного рассогласования и не связанные с распространением радиоволн можно положить равными 3 и 1 дБ соответственно. Потерями в атмосферных газах и гидрометеорах в диапазоне до

6 ГГц можно пренебречь, т. к. они на расстоянии до БПЛА 10 км не превышают 0,1 дБ [19; 20; 21].

На рисунках 3 и 4 приведены графики зависимости энергетического

запаса в линии радиосвязи между БПЛА и НКУ при передаче видеoinформации HD и FHD качества соответственно в диапазонах 2,4 и 5,8 ГГц, полученные с использованием выражений (7) – (10).

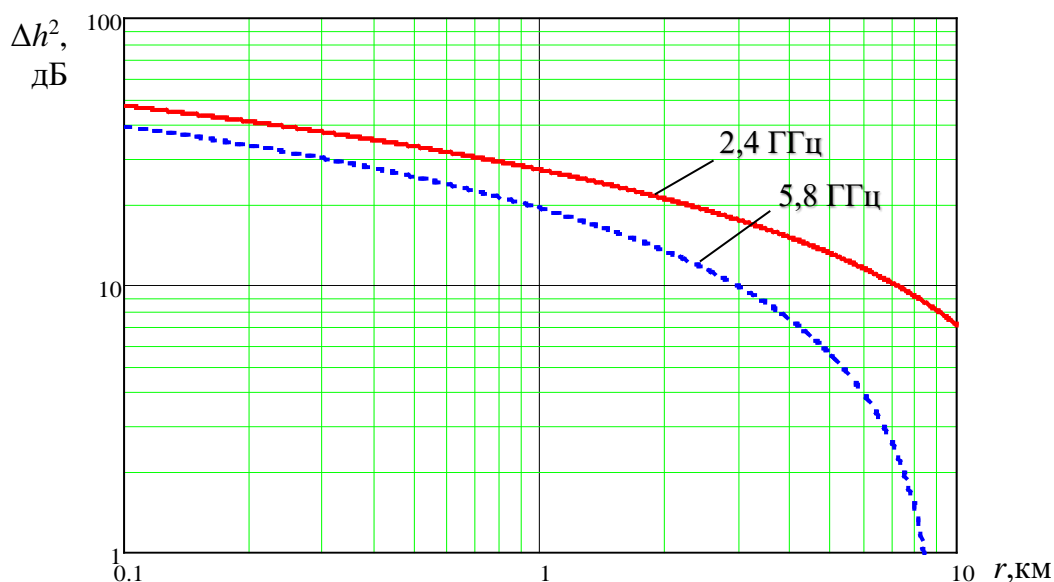


Рис. 3. Графики зависимости энергетического запаса в линии радиосвязи между БПЛА и НКУ при передаче видеoinформации HD (H.265) качества методом ФМ-4 в диапазонах 2,4 и 5,8 ГГц

Fig. 3. Graphs of the dependence of the energy reserve in the radio communication line between the UAV and the NCU during the transmission of video information HD (H.265) quality by the FM-4 method in the 2,4 and 5,8 GHz bands

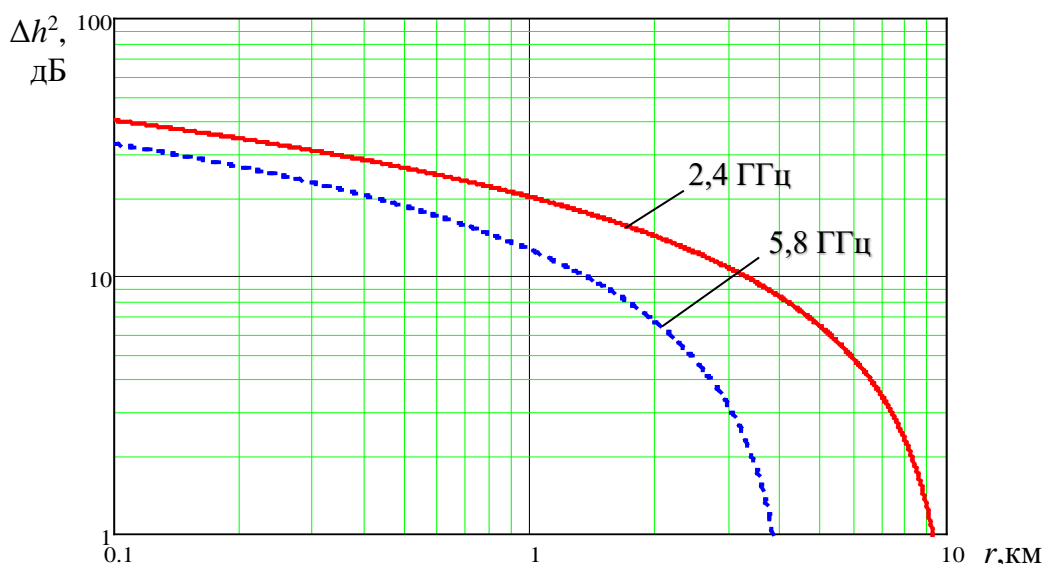


Рис. 4. Графики зависимости энергетического запаса в линии радиосвязи между БПЛА и НКУ при передаче видеoinформации FHD (H.265) качества методом КАМ-16 в диапазонах 2,4 и 5,8 ГГц

Fig. 4. Graphs of the dependence of the energy reserve in the radio communication line between the UAV and the NCU when transmitting FHD (H.265) quality video information by the QAM-16 method in the 2,4 and 5,8 GHz bands

Анализ графиков, приведенных на рисунках 3 и 4, показывает:

- максимальная дальность организации передачи видеоинформации HD качества с БПЛА методом ФМ-4 с использованием турбокодирования Turbo 7/8 в диапазонах 2,4 и 5,8 ГГц составляет 3 и 7 км соответственно;

- максимальная дальность организации передачи видеоинформации FHD качества с БПЛА методом КАМ-16 с использованием турбокодирования Turbo 7/8 в диапазонах 2,4 и 5,8 ГГц составляет 1,4 и 3,3 км соответственно.

Выводы

Итак, в статье:

- выполнена оценка максимальной дальности радиосвязи между БПЛА и НКУ, которая ограничена прямой видимостью и слабо зависит от высоты подь-

ема антенны мобильного НКУ и при высоте подъема БПЛА от 100 до 500 м составляет от 40 до 85 км;

- приведены аналитические выражения для оценки энергетического потенциала линии радиосвязи прямой видимости при мониторинге чрезвычайных ситуаций, учитывающие параметры приема-передающего тракта и энергетические потери в непрерывном канале связи;

- получены графики зависимости энергетического запаса в линии радиосвязи между БПЛА и НКУ при передаче видеоинформации различного качества методами ФМ-4 и КАМ-16 с использованием турбокодирования (Turbo 7/8);

- оценены максимальные дальности передачи видеоинформации HD- и FHD-качества, которые составили от 3 до 7 км и от 1,4 до 3,3 км в диапазонах 2,4 и 5,8 ГГц соответственно.

Список литературы

1. Попов Н. И., Ефимов С. В. Использование беспилотных летательных аппаратов в МЧС России // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Воронеж, 2016. С. 149–151. URL: <https://www.masters.donntu.ru/2017/etf/nizhenets/library/article2.htm> (дата обращения: 05.03.2023).

2. Салахутдинов И. Т. Подход к оценке реализуемости создания авиационной системы (на примере транспортной беспилотной авиационной системы) // Modern Economy Success. 2023. № 1. С. 231–243.

3. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. СПб.: Научное издание, 2020. 204 с.

4. Андронов В. Г., Чуев А. А., Князев А. А. Модель параметров отклонений маршрута полёта беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25, № 4. С. 145–161.

5. Салахутдинов И. Т. Анализ переоснащения авиационной транспортной системы в транспортные беспилотные авиационные системы на различных этапах жизненного цикла // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право. 2020. № 7. С. 67–71.

6. Садовская Е. В. Применении сетевых технологий как решение проблемы передачи больших объёмов данных на большие расстояния при общении БПЛА-наземный пункт управления // Гагаринские чтения – 2020: сборник тезисов докладов. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2020. С. 643–644.

7. Мухин И. Е., Ветрова А. С. Выбор антенн для малых беспилотных летательных аппаратов // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам VI Всероссийской научно-практической конференции, Курск, 14–15 апреля 2022 года / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2022. С. 45–50.

8. Слюсар В. Передача данных с борта БПЛА: стандарты НАТО // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2010. № 3(101). С. 80–87.

9. Интеллектуальная система обработки изображений, получаемых с беспилотных летательных аппаратов / С. А. Филист, Р. А. Томакова, Н. Г. Нефедов [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 64–85.

10. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / под ред. А. В. Назаренко, Л. А. Худяковой. 2-е изд. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.

11. Довбня В. Г., Азиатцев В. Е., Михайлов С. Н. Помехоустойчивость радиоприемных систем цифровых линий связи: монография / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2017. 175 с.

12. Малоразмерные беспилотные летательные аппараты: задачи обнаружения и пути их решения / И. И. Олейник, А. А. Черноморец, В. Г. Андронов [и др.]; Юго-Западный государственный университет. Курск, 2021. 171 с.

13. Техническая реализация высокоскоростного информационного канала радиосвязи с беспилотного летательного аппарата на наземный пункт управления / Д. Г. Пантенков, Н. В. Гусаков, А. Т. Егоров [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15, № 5. С. 52–71.

14. Диденко М. Г. Радиосигналы в спутниковых системах связи. URL: <https://www.studylib.net/doc/26117799/radiosignaly-v-sputnikovyh-sistemah-svyazi> (дата обращения: 17.03.2023).

15. Анализ стандартов передачи данных, связи и управления между наземным пунктом управления и беспилотным летательным аппаратом / З. А. Дмитриев, А. И. Знаменский, Н. Ю. Кундин [и др.] // Научная мысль. 2022. Т. 19, № 1-1(43). С. 87–91.

16. Андронов В. Г., Чуев А. А., Луценко М. Н. Области и особенности применения различных типов беспилотных летательных аппаратов // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам V Всероссийской научно-практической конференции, Курск, 15–16 апреля 2021 года / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2021. С. 316–323.

17. Яронова Н. В., Аметова А. А. Использование беспилотных летательных аппаратов для передачи данных // *Universum: технические науки*. 2021. № 11-2(92). С. 92–94.
18. Данилов Д. В., Емельев К. С. О повышении помехоустойчивости физического интерфейса беспилотного летательного аппарата // *Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития: сборник материалов X Международной научно-практической конференции*, Чебоксары, 21 мая 2018 года / редколлегия: О. Н. Широков [и др.]. Чебоксары: Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс», 2018. С. 152–154.
19. Чуев А. А. Принципы организации автономной навигации беспилотных летательных аппаратов // *Исторические, философские, методологические проблемы современной науки: сборник статей III Международной научной конференции молодых ученых*, Курск, 20 мая 2020 года. Курск: Университетская книга, 2020. С. 481–485.
20. Чуднов А. М., Губская О. А., Кичко Я. В. Методика анализа вероятностно-временных характеристик обмена сообщениями в комплексе беспилотных летательных аппаратов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021. № 11. С. 117–124.
21. Пантенков Д. Г. Результаты анализа наземных испытаний комплекса средств спутниковой радиосвязи для беспилотных летательных аппаратов // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2019. № 69. С. 42–51.

References

1. Popov N. I., Efimov S. V. Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov v MChS Rossii [The use of unmanned aerial vehicles in the Ministry of Emergency Situations of Russia]. *Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsii* [Problems of ensuring safety in the aftermath of emergencies]. Voronezh, 2016, pp. 149–151. Available at: <https://www.masters.donntu.ru/2017/etf/nizhenets/library/article2.htm>. (accessed 05.03.2023)
2. Salakhutdinov I. T. Podkhod k otsenke realizuemosti sozdaniya aviatsionnoi sistemy (na primere transportnoi bespilotnoi aviatsionnoi sistemy) [An approach to assessing the feasibility of creating an aviation system (on the example of a transport unmanned aircraft system)]. *Modern Economy Success*, 2023, no. 1, pp. 231–243.
3. Makarenko S. I. Protivodeistvie bespilotnym letatel'nykh apparatam [Countering unmanned aerial vehicles]. St. Petersburg, Science-intensive technologies Publ., 2020. 204 p.
4. Andronov V. G., Chuev A. A., Knyazev A. A. Model' parametrov otklonenii marshruta poleta bespilotnykh letatel'nykh apparatov ot zadannoi traektorii [Model of parameters of deviations of the flight route of unmanned aerial vehicles from a given trajectory]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 145–161.

5. Salakhutdinov I. T. Analiz pereosnashcheniya aviatsionnoi transportnoi sistemy v transportnye bespilotnye aviatsionnye sistemy na razlichnykh etapakh zhiznennogo tsikla [Analysis of the re-equipment of the aviation transport system into transport unmanned aircraft systems at various stages of the life cycle]. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Ekonomika i pravo = Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice, Series: Economics and Law*, 2020, no. 7, pp. 67–71.

6. Sadovskaya E. V. [The use of network technologies as a solution to the problem of transmitting large amounts of data over long distances when communicating UAV-ground control point]. *Gagarinskie chteniya – 2020. Sbornik tezisov dokladov* [Gagarin Readings – 2020. Collection of abstracts]. Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University) Publ., 2020, pp. 643–644. (In Russ.)

7. Mukhin I. E., Vetrova A. S. [The choice of antennas for small unmanned aerial vehicles]. *Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei po materialam VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Kursk, 14–15 aprelya 2022 goda* [Infocommunications and space technologies: state, problems and solutions. Collection of scientific articles based on the materials of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference, Kursk, April 14–15, 2022]. Kursk, Southwest State University Publ., 2022, pp. 45–50. (In Russ.)

8. Slyusar V. Peredacha dannykh s borta BPLA: standarty NATO [Data transmission from the UAV: NATO standards]. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*, 2010, no. 3(101), pp. 80–87.

9. Filist S. A., Tomakova R. A., Nefedov N. G., eds. Intellekтуal'naya sistema obrabotki izobrazhenii, poluchaemykh s bespilot-nykh letatel'nykh apparatov [Intelligent image processing system obtained from unmanned aerial vehicles]. *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*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 64–85.

10. Sklyar B. Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye [Digital communication. Theoretical foundations and practical application]; ed. by A. V. Nazarenko, L. A. Khudyakova. 2nd ed. Moscow, Williams Publ., 2003. 1104 p.

11. Dovbnya V. G., Asiantsev V. E., Mikhailov S. N. Pomekhoustoichivost' radio-priemnykh sistem tsifrovyykh linii svyazi [Noise immunity of radio receiving systems of digital communication lines]. Kursk, Southwest State University Publ., 2017. 175 p.

12. Oleinik I. I., Chernomorets A. A., Andronov V. G., eds. Malorazmernye bespilotnye letatel'nye apparaty: zadachi obnaruzheniya i puti ikh resheniya [Small-sized unmanned aerial vehicles: detection tasks and ways to solve them]. Kursk, Southwest State University Publ., 2021. 171 p.

13. Pantenkov D. G., Gusakov N. V., Egorov A. T., eds. Tekhnicheskaya realizatsiya vysokoskorostnogo informatsionnogo kanala radiosvyazi s bespilotnogo letatel'nogo apparata

na nazemnyi punkt upravleniya [Technical implementation of a high-speed information channel of radio communication from an unmanned aerial vehicle to a ground control point]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2019, vol. 15, no. 5, pp. 52–71.

14. Didenko M. G. Radiosignaly v sputnikovykh sistemakh svyazi [Radio signals in satellite communication systems]. Available at: <https://www.studylib.net/doc/26117799/radiosignaly-v-sputnikovykh-sistemah-svyazi>. (accessed 17.03.2023)

15. Dmitriev Z. A., Znamensky A. I., Kundin N. Y., eds. Analiz standartov peredachi dannykh, svyazi i upravleniya mezhdu nazemnym punktom upravleniya i bespilotnym letatel'nykh apparatom [Analysis of data transmission, communication and control standards between a ground control point and an unmanned aerial vehicle]. *Nauchnaya mysl' = Scientific Thought*, 2022, vol. 19, no. 1-1(43), pp. 87–91.

16. Andronov V. G., Chuev A. A., Lutsenko M. N. [Areas and features of the use of various types of unmanned aerial vehicles]. *Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei po materialam V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Infocommunications and space technologies: state, problems and solutions. Collection of scientific articles based on the materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference, Kursk, April 15–16, 2021]. Kursk, Southwest State University Publ., 2021, pp. 316–323. (In Russ.)

17. Yaronova N. V., Ametova A. A. Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya peredachi dannykh [The use of unmanned aerial vehicles for data transmission]. *Universum: tekhnicheskie nauki = Universum: Technical Sciences*, 2021, no. 11-2(92), pp. 92–94.

18. Danilov D. V., Emelyev K. S. [On increasing the noise immunity of the physical interface of an unmanned aerial vehicle]. *Nauka, obrazovanie, obshchestvo: tendentsii i perspektivy razvitiya. Sbornik materialov X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Cheboksary, 21 maya 2018 goda* [Science, education, society: trends and prospects of development. Collection of materials of the X International Scientific and Practical Conference, Cheboksary, May 21, 2018]; ed. by O. N. Shirokov, eds. Cheboksary, Center for Scientific Cooperation "Interactive Plus" Publ., 2018, pp. 152–154. (in Russ.)

19. Chuev A. A. [Principles of the organization of autonomous navigation of unmanned aerial vehicles]. *Istoricheskie, filosofskie, metodologicheskie problemy sovremennoi nauki. Sbornik statei III Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh* [Historical, philosophical, methodological problems of modern science. Collection of articles of the 3rd International Scientific Conference of Young Scientists, Kursk, May 20, 2020]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2020, pp. 481–485. (In Russ.)

20. Chudnov A. M. Gubskaya O. A., Kichko Ya. V. Metodika analiza veroyatnostno-vremennykh kharakteristik obmena soobshcheniyami v komplekse bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Methodology for analyzing the probabilistic-temporal characteristics of messaging

in a complex of unmanned aerial vehicles]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula State University. Technical sciences*, 2021, no. 11, pp. 117–124.

21. Pantenkov D. G. Rezul'taty analiza nazemnykh ispytaniy kompleksa sredstv sputnikovoi radiosvyazi dlya bespilotnykh letatel'nykh apparatov [The results of the analysis of ground tests of the satellite radio communication complex for unmanned aerial vehicles]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University*, 2019, no. 69, pp. 42–51.

Информация об авторах / Information about the Authors

Алемпьев Михаил Юрьевич, аспирант кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mihail.alempiev@mail.ru

Mikhail Y. Alimpiev, Post-Graduate Student of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mihail.alempiev@mail.ru

Коптев Дмитрий Сергеевич, старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: d.s.koptev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7759-579X

Dmitry S. Koptev, Senior Lecturer of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: d.s.koptev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7759-579X

Довбня Виталий Георгиевич, профессор кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vit_georg@mail.ru

Vitaly G. Dovbnya, Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vit_georg@mail.ru

Скрипкина Елена Васильевна, доцент кафедры математики и естественно-научных дисциплин, Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А. А. Леонова, Московская область, г. Королев, Российская Федерация, e-mail: lenagrants35@mail.ru

Elena V. Skripkina, Associate Professor of the Department of Mathematics and Natural Sciences, Leonov University of Technology, Korolev, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: lenagrants35@mail.ru

Автоматизированное распознавание и контроль взаимодействия людей по видеоизображению

А. Д. Ульянов¹ ✉, А. Р. Донская¹, А. В. Зубков¹

¹ Волгоградский государственный технический университет
пр-т им. В. И. Ленина, д. 28, г. Волгоград 400005, Российская Федерация

✉ e-mail: ulyev-ad@yandex.ru

Резюме

Целью исследования является повышение эффективности распознавания и контроля взаимодействия покупателей и продавцов магазинов за счет разработки модели автоматизированного распознавания и контроля взаимодействия людей по видеоизображению.

Методы. Исследование направлено на решение фундаментальной научной задачи разработки моделей и методов контроля и распознавания взаимодействия людей по видеоизображению.

В настоящий момент сфера торговли стремительно развивается, появляется все больше онлайн-ресурсов, которые забирают на себя значимую часть потока клиентов, в связи с чем обычным магазинам и торговым центрам необходимо внедрять новые способы и методы взаимодействия с покупателями, а следовательно, предоставлять более качественный сервис.

Современные компании стараются решать подобную проблему разными путями: подсчетом посетителей, приборами контроля, различными нейросетевыми решениями и так далее. Однако ни одно из имеющихся на данный момент на рынке предложений не способно автоматически классифицировать человека как покупателя или продавца по видеоизображению, а также оценить степень удовлетворенности клиента предоставленным сервисом.

Для исправления данной ситуации были разработаны методы и модели, позволяющие разработать на их базе программные средства, с помощью которых станет возможно определить удовлетворенность посетителей и клиентов, распознать среди людей клиентов и продавцов и определить качество работы сотрудников.

Результаты. Разработаны модели и методы классификации клиентов и продавцов по униформе, методы определения уровня взаимодействия продавцов и клиентов на базе алгоритмов определения удовлетворенности посетителей и клиентов по голосу и лицу и алгоритмов определения качества работы сотрудников.

Заключение. В результате разработаны модели, позволяющие улучшить качество взаимодействия продавцов и клиентов по видеоизображению.

Ключевые слова: нейронная сеть; искусственный интеллект; распознавание позы человека; мониторинг поведения.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке ВолгГТУ в рамках научного проекта № 60/478-22, № 60/473-22.

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

Для цитирования: Ульянов А. Д., Донская А. Р., Зубков А. В. Автоматизированное распознавание и контроль взаимодействия людей по видеоизображению // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 45–64. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-45-64>.

Поступила в редакцию 15.04.2023

Подписана в печать 11.05.2023

Опубликована 30.06.2023

Automated Recognition and Control of Human Interaction by Video Image

Andrey D. Ulyev¹ ✉, Anastasia R. Donsckaia, Alexander V. Zubkov

¹ Volgograd State Technical University
28 V. I. Lenin Ave., Volgograd 400005, Russian Federation

✉ e-mail: ulyev-ad@yandex.ru

Abstract

The purpose of research is to increase the efficiency of recognition and control of interaction between buyers and sellers of stores by developing a model of automated recognition and control of human interaction by video image.

Methods. The research is aimed at solving the fundamental scientific problem of developing models and methods for monitoring and recognizing human interaction by video image.

At the moment, the sphere of trade is rapidly developing, there are more and more online resources that take over a significant part of the flow of customers, and therefore, ordinary stores and shopping centers need to introduce new ways and methods of interacting with customers, and therefore provide a better service.

Modern companies are trying to solve this problem in different ways: counting visitors, monitoring devices, various neural network solutions, and so on. However, none of the currently available offers on the market is able to automatically classify a person as a buyer or seller by video image, as well as to assess the degree of customer satisfaction with the service provided.

To remedy this situation, methods and models have been developed that make it possible to develop software based on them, with the help of which it will be possible to determine the satisfaction of visitors and customers, recognize customers and sellers among people and determine the quality of employees' work.

Results. Models and methods for classifying customers and sellers by uniform, methods for determining the level of interaction between sellers and customers based on algorithms for determining the satisfaction of visitors and customers by voice and face, and algorithms for determining the quality of employees' work have been developed.

Conclusion. As a result, models have been developed that allow improving the quality of interaction between sellers and customers by video image.

Keywords: neural network; artificial intelligence; human posture recognition; behavior monitoring.

Funding: The reported study was funded by VSTU according to the research project No. 60/478-22, 60/473-22.

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

For citation: Ulyev A. D., Donskaia A. R., Zubkov A. V. Automated Recognition and Control of Human Interaction by Video Image. *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(2): 45–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-45-64>.

Received 15.04.2023

Accepted 11.05.2023

Published 30.06.2023

Введение

Анализ поведения человека и его идентификация по информации, полученной с видеокамер, является весьма актуальной проблемой для современного общества.

В настоящий момент сфера торговли стремительно развивается, появляется все больше онлайн-ресурсов, которые забирают на себя значимую часть потока клиентов, в связи с чем обычным магазинам и торговым центрам необходимо внедрять новые способы и методы взаимодействия с покупателями, а следовательно, предоставлять более качественный сервис [1].

Современные компании стараются решать подобную проблему разными путями: подсчетом посетителей [2], приборами контроля [3], различными нейросетевыми решениями [4; 5] и т. д. Множество компаний во всем мире ведут разработку в направлении видеоаналитики и интеллектуального анализа происходящего в кадре события, например, Apple, Facebook, Google, Intel и т. д. Большинство решений также связаны с распознаванием лиц на изображении, например, в аэропортах США используется система, которая идентифицирует лица пассажиров. В Китае подобные тех-

нологии зашли еще дальше, и идентификация происходит не только по лицу, но и по походке. Австралия использует биометрию и анализ лиц для прохождения таможни и паспортного контроля.

Однако ни одно из имеющихся на данный момент на рынке предложений не способно автоматически классифицировать человека как покупателя или продавца по видеоизображению, не идентифицируя при этом лицо человека, а также оценить степень удовлетворенности клиента предоставленным сервисом. На данный момент нет ни только автоматического решения, которое помогло бы сделать вывод об удовлетворенности или неудовлетворенности клиента, т. е. подсказать, чем именно был недоволен клиент, но и модели автоматической оценки удовлетворенности также отсутствуют на данный момент, все представленные исследования базируются на опросах и проводятся уже постфактум [6; 7; 8].

Из всего вышесказанного следует, что на данный момент существует потребность в разработке единого подхода к автоматизированному распознаванию, контролю взаимодействия сотрудников и посетителей по видеоизображению для повышения качества обслуживания [9].

Целью работы является повышение эффективности распознавания и контроля взаимодействия покупателей и продавцов магазинов за счет разработки модели автоматизированного распознавания и контроля взаимодействия людей по видеоизображению.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ существующих моделей, методов и средств контроля за взаимодействие людей на изображении.
2. Разработать модель для автоматизированного распознавания и контроля взаимодействия людей по видеоизображению.
3. Разработать метод классификации сотрудников и покупателей по видеоизображению.
4. Разработать метод контроля уровня взаимодействия сотрудника и посетителя по видеоизображению.

Материалы и методы

Модель автоматизированного распознавания и контроля взаимодействия людей по видеоизображению описывается следующей формулой (1):

$$Q = F_{compl} \times \left(\begin{array}{l} < F_{st}(\omega_j); F_{cls}(< \tilde{\omega}; \eta_i; \theta >); F_{ident}(< \eta_i; \tilde{\varphi}_a; v >) > \\ F_{tr}(< \tilde{\omega}; \eta_i; \rho(t) >); F_{qual}(< \tilde{\omega}(t); \eta_i(t); v; \gamma >); \\ F_{sarvoic}(< \tilde{\omega}; \eta_i; \lambda; \gamma >); F_{satface}(< \mu; v; \gamma >); \\ F_{ac}(< \gamma; \tau; v; \zeta; \psi; \kappa >) > \end{array} \right), \quad (1)$$

где Q – общая оценка взаимодействия сотрудника и посетителя; F_{compl} – комплексный метод распознавания и контроля взаимодействия людей по видеоизображению, содержащий совокупность всех имеющихся методов и алгоритмов; F_{st} – алгоритм стабилизации

ключевых точек; F_{cls} – алгоритм классификации сотрудников и покупателей; F_{ident} – алгоритм идентификации личности; F_{tr} – алгоритм межкамерного и межкадрового трекинга; F_{qual} – алгоритм определения качества работы сотрудника; $F_{sarvoic}$ – алгоритм определения удовлетворенности клиента по голосу; $F_{satface}$ – алгоритм определения удовлетворенности клиента по изображению лица; F_{ac} – метод аккумуляции и консолидации данных; η_i – изображение с i -й камеры; v – база фотографий лиц сотрудников магазина; λ – аудиопоток голоса посетителя; ω_j – координаты ключевых точек j -го человека:

$$\omega = < \varphi_a; \varphi_b; \varphi_c; \varphi_d; \varphi_e >, \quad (2)$$

где φ_a – координаты ключевых точек лица; φ_b – координаты точек плечей и рук; φ_c – координаты точек кистей; φ_d – координаты точек таза; φ_e – координаты точек ног и ступней;

$$\tilde{\omega}_j = < \tilde{\varphi}_{aj}; \tilde{\varphi}_{bj}; \tilde{\varphi}_{cj}; \tilde{\varphi}_{dj}; \tilde{\varphi}_{ej} > = F_{st}(\omega_j),$$

$$F_{st}(\omega_j) = F_{st}(\varphi_{aj}; \varphi_{bj}; \varphi_{cj}; \varphi_{dj}; \varphi_{ej}), \quad (3)$$

где $\tilde{\omega}_j$ – стабилизированные ключевые точки j -го человека; $\tilde{\varphi}_a$ – стабилизированные координаты ключевых точек лица; $\tilde{\varphi}_b$ – стабилизированные координаты точек плечей и рук; $\tilde{\varphi}_c$ – стабилизированные координаты точек кистей; $\tilde{\varphi}_d$ – стабилизированные координаты точек таза; $\tilde{\varphi}_e$ – стабилизированные координаты точек ног и ступней; j – порядковый номер человека на изображении; $F_{st}(\omega_j)$ – ключевые точки, обработанные алгоритмом стабилизации; $F_{st}(< \varphi_{aj}; \varphi_{bj}; \varphi_{cj}; \varphi_{dj}; \varphi_{ej} >)$ – ключевые точки j -го человека, обработанные алгоритмом стабилизации в разрезе

принадлежности частям тела (точки лица, точки плечей и рук, точки кистей, точки таза, точки ног и ступней).

$$\gamma = F_{cls}(< \tilde{\omega}_j; \eta_i; \theta >), \quad (4)$$

где γ – классификация сотрудника и клиента; $\tilde{\omega}_j$ – стабилизированные ключевые точки j -го человека; η_i – изображение с i -й камеры; θ – цветовой диапазон сотрудников магазина.

$$\tau = F_{ident}(< \eta_i; \tilde{\varphi}_{aj}; v >), \quad (5)$$

где τ – информация об идентификации личности; η_i – изображение с i -й камеры; $\tilde{\varphi}_{aj}$ – стабилизированные координаты ключевых точек лица j -го человека; v – база фотографий лиц сотрудников.

$$\iota = F_{tr}(< \tilde{\omega}_j; \eta_i; \rho(t); >), \quad (6)$$

где ι – информация о межкамерном и межкадровом трекинге; $\tilde{\omega}_j$ – стабилизированные ключевые точки j -го человека; η_i – изображение с i -й камеры; t – время работы; ρ – информация о ранее установленных цветовых диапазонах для межкамерного и межкадрового трекинга; $\rho(t)$ – цветовые диапазоны в разрезе времени.

$$\zeta = F_{qual}(< \tilde{\omega}_j(t); \eta_i(t); \iota; \gamma >), \quad (7)$$

где ζ – рекомендательная оценка работы сотрудника по взаимодействию с клиентом; $\tilde{\omega}_j$ – стабилизированные ключевые точки j -го человека; η_i – изображение с i -й камеры; t – время работы; $\tilde{\omega}_j(t)$ – стабилизированные ключевые точки j -го человека в разрезе времени; $\eta_i(t)$ – изображения с i -й камеры в разрезе времени; ι – информация о межкамерном и межкадровом трекинге; γ – классификация сотрудников и клиентов.

$$\psi = F_{satvoic}(< \tilde{\omega}_j; \eta_i; \lambda; \gamma >), \quad (8)$$

где ψ – уровень удовлетворенности клиента по голосу; $\tilde{\omega}_j$ – стабилизированные ключевые точки j -го человека; η_i – изображение с i -й камеры; λ – аудиопоток голоса клиента с кассы; ι – информация о межкамерном и межкадровом трекинге; γ – классификация сотрудников и клиентов.

$$\kappa = F_{satface}(< \mu; \iota; \gamma >), \quad (9)$$

где κ – уровень удовлетворенности клиента по изображению лица; μ – видеопоток с камеры, установленной при входе; γ – классификация сотрудников и клиентов; ι – информация о межкамерном и межкадровом трекинге.

$$Q = F_{ac}(< \gamma; \tau; \iota; \zeta; \psi; \kappa >), \quad (10)$$

где Q – общая оценка взаимодействия сотрудника и посетителя; F_{ac} – метод аккумуляции и консолидации данных; ι – информация о межкамерном и межкадровом трекинге; γ – классификация сотрудников и клиентов; κ – уровень удовлетворенности клиента по изображению лица; ζ – рекомендательная оценка работы сотрудника магазина по взаимодействию с клиентом; ψ – уровень удовлетворенности клиента по голосу; τ – информация об идентификации личности.

На рисунке 1 представлен разработанный комплексный метод распознавания и контроля взаимодействия людей по видеоизображению, на рисунке 2 показана работа метода в режиме многопоточности.

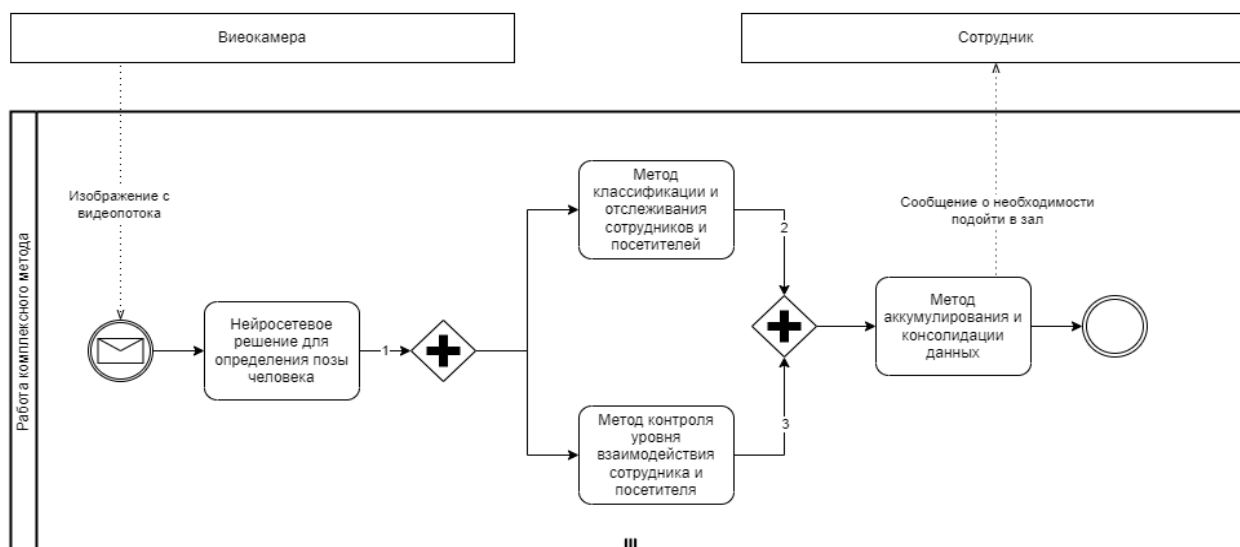
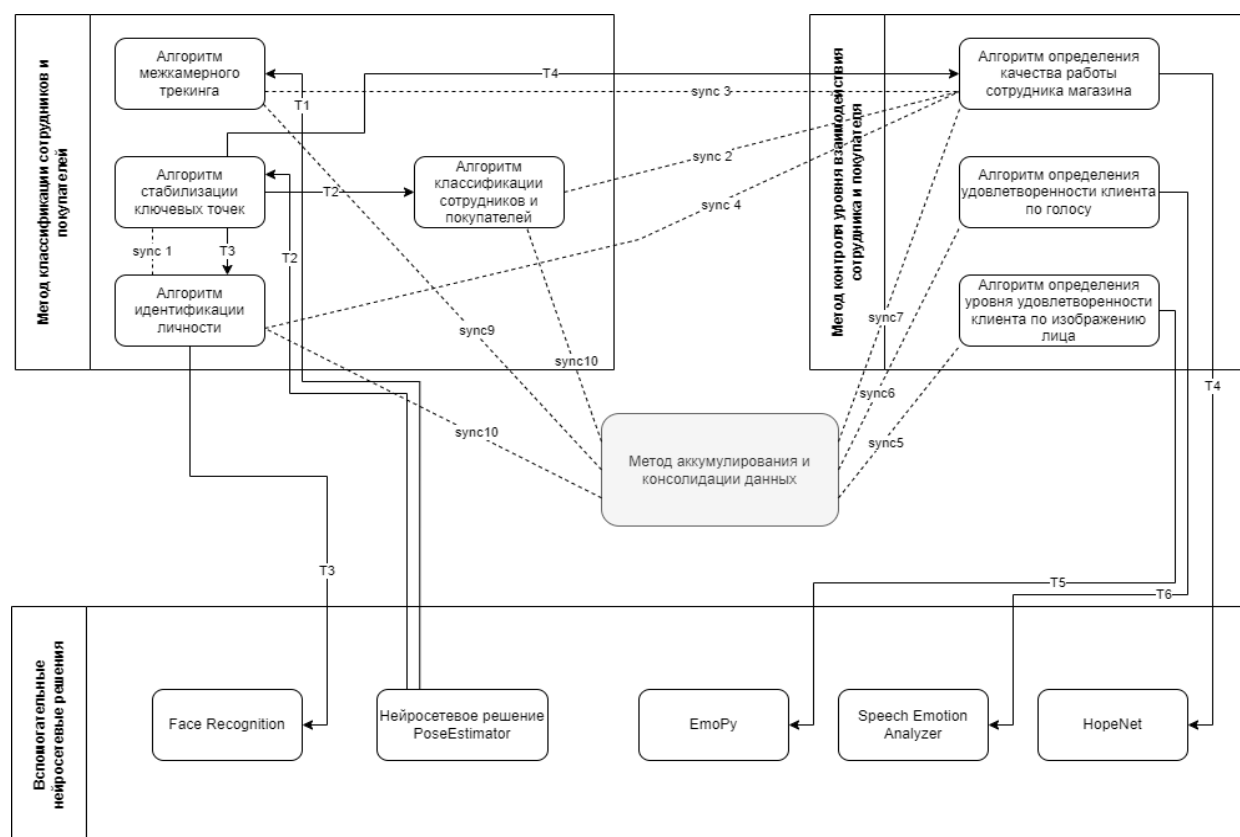


Рис. 1. Комплексный метод распознавания и контроля взаимодействия людей по видеоизображению (BPMN-диаграмма)

Fig. 1. Complex method of recognition and control of human interaction by video image (BPMN-diagram)



Где T - поток или группа потоков

sync - методы синхронизации между потоками

Рис. 2. Комплексный метод распознавания и контроля взаимодействия людей по видеоизображению в режиме многопоточности

Fig. 2. Complex method of recognition and control of human interaction by video image in multithreading mode

Первым этапом происходит определение позы человека по изображению, полученному с видеокамеры, на основе нейросетевого решения. Такое решение позволяет рассчитать координаты соединения костей человека, а также координаты ушей и глаз в трехмерном пространстве на изображении.

После чего данные о ключевых точках человека (рис. 1) передаются в два параллельно работающих метода (при-

мер в табл.): «Метод классификации и отслеживания перемещения сотрудников и посетителей» и «Метод контроля уровня взаимодействия сотрудника и посетителя». После завершения работы методов данные о классификации и отслеживании перемещения и информация о качестве работы сотрудника и удовлетворенности посетителя (рис. 1) передаются в «Метод аккумуляирования и консолидации информации».

Таблица. Пример координат ключевых точек распознанного человека на изображении

Table. Example of the coordinates of the key points of the recognized person in the image

Координаты ключевых точек тела человека Coordinates of key points of the human body	Определение ключевых точек тела человека Identification of key points of the human body
[[0, 329, 117], [1, 348, 76], [2, 362, 73], [3, 376, 70], [4, 310, 83], [5, 298, 85], [6, 286, 86], [7, 408, 67], [8, 282, 90], [9, 364, 137], [10, 317, 146], [11, 519, 172], [12, 242, 217], [13, 613, 352], [14, 190, 417], [15, 675, 532], [16, 132, 592], [17, 712, 572], [18, 101, 629], [19, 689, 579], [20, 118, 624], [21, 661, 568], [22, 138, 613], [23, 473, 398], [24, 355, 411], [25, 472, 495], [26, 356, 492], [27, 445, 489], [28, 352, 489], [29, 438, 482], [30, 357, 482], [31, 446, 547], [32, 351, 546]]	0–10 элементы массива – φ_a – координаты точек лица (уши, глаза, рот). 11–16 элементы массива – φ_b – координаты точек плеч и рук. 17–22 – φ_c – координаты точек кистей. 23–24 – φ_d – координаты точек таза. 26–32 – φ_e – координаты точек ног и ступней

На рисунке 3 представлен метод классификации и отслеживания перемещения сотрудников и посетителей. В рассматриваемом методе в параллельном режиме работают следующие алгоритмы: алгоритм межкамерного и межкадрового трекинга, алгоритм стабилизации ключевых точек и алгоритм иден-

тификации личности. Во все вышеописанные алгоритмы на вход поступают данные о расположении ключевых точек человека с нейросетевого решения для определения позы человека (рис. 3). В таблице представлен пример координат ключевых точек распознанного на изображении человека.

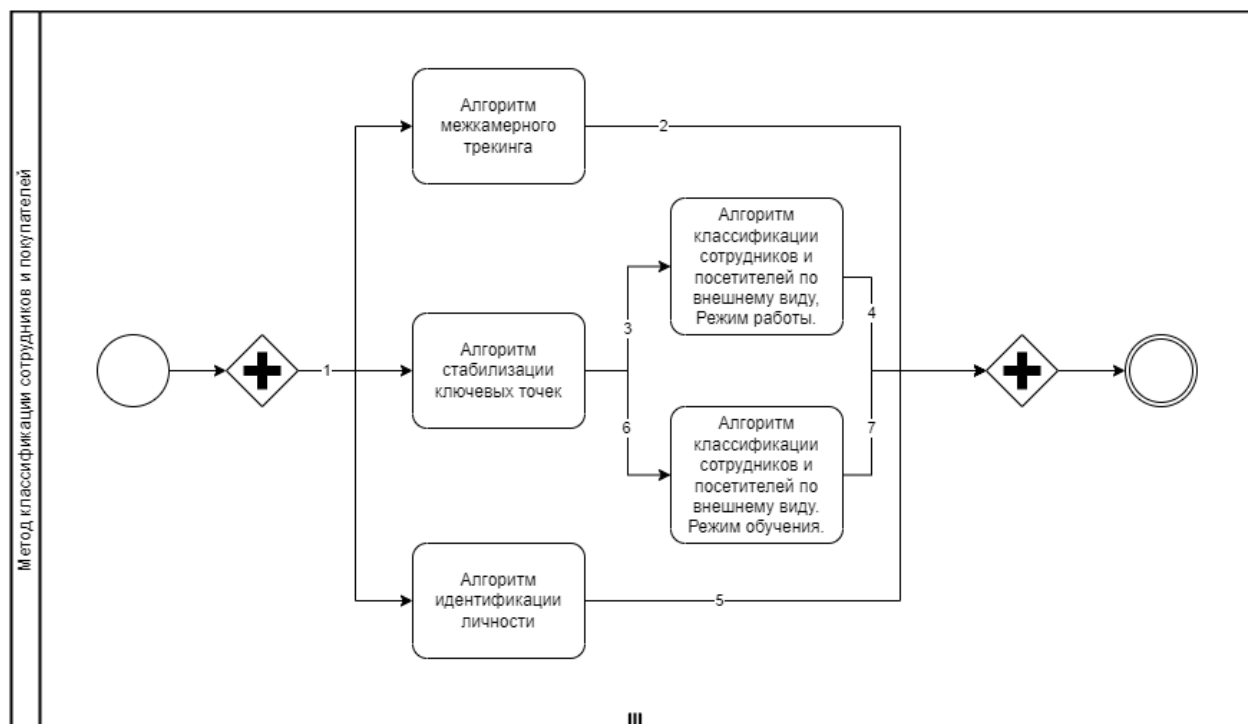


Рис. 3. Метод классификации и отслеживания перемещения сотрудников и покупателей (BPMN-диаграмма) [10; 11; 12]

Fig. 3. Method of classifying and tracking the movement of employees and customers (BPMN-diagram) [10; 11; 12]

Основной задачей *алгоритма межкамерного и межкадрового трекинга* является решение задачи отслеживания перемещения людей по территории организации с помощью средств видеофиксации. Результатом работы метода является информация о перемещении людей по территории магазина (рис. 3).

Алгоритм стабилизации ключевых точек предназначен для определения недостающих точек соединения костей с целью определения примерной области расположения предметов униформы сотрудника магазина. Указанный алгоритм вычисляет недостающие точки, основываясь на физиологическом строении человека. Согласно алгоритму, рассчитывается примерное местоположение

недостающей ключевой точки. Так, например, для вычисления координат недостающей точки плеча необходимо от второй точки плеча отложить горизонтальный вектор в сторону рассчитываемой точки. После чего от точки таза, находящейся с той же стороны, что и недостающая точка, отложить вектор в сторону недостающей точки плеча. На пересечении двух векторов будет находиться примерная координата недостающей точки плеча, что позволит успешно строить область в дальнейшем. По завершении работы алгоритм передает информацию о ключевых точках \tilde{w} в алгоритм классификации сотрудников и посетителей по внешнему виду (рис. 4 и 5).



Рис. 4. Контекстная диаграмма работы алгоритма стабилизации ключевых точек

Fig. 4. Contextual diagram of the key point stabilization algorithm

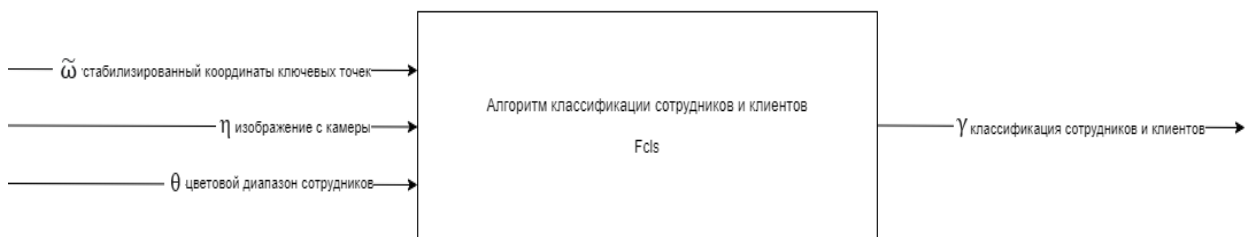


Рис. 5. Контекстная диаграмма работы алгоритма классификации сотрудников и посетителей

Fig. 5. Contextual diagram of the algorithm for classifying employees and visitors

Алгоритм классификации сотрудников и посетителей (рис. 5) за счет вычисления вхождений цветов униформы в установленный ранее (на моменте обучения) цветовой диапазон производит классификацию сотрудников и посетителей (рис. 3). Перед началом работы алгоритма требуется запустить режим «обучения» возможным цветам униформы в кадре, согласно которому сотруднику необходимо в произвольном режиме перемещаться по магазину. В период такого перемещения алгоритм определяет область туловища и область головы (на основе информации о ключевых точках), после чего сохраняет информацию о доминирующей цвете униформы (футболки и при наличии кепки)

[13]. После того как закончится режим «обучения» возможным цветам униформы, начнется вычисление среднего доминирующего цвета среди всех найденных. После этого данный доминирующий цвет будет считаться опорной точкой для формирования цветového диапазона, который впоследствии будет использоваться для того, чтобы отнести человека к той или иной группе. Стоит учесть, что предварительно необходимо установить погрешность, в рамках которой в дальнейшем будет сформирован цветовой диапазон. В разработанном алгоритме ответственным за это является администратор, который откладывает от опорной точки равные отрезки по трем векторам (H, S

и V) в двух направлениях – положительном и отрицательном [14; 15].

Диапазон возможных значений цветов униформы сотрудника по вектору H рассчитывается по формуле (11):

$$H_d = [H_a - \delta; H_a + \delta]; \quad (11)$$

где H_d – диапазон возможных значений цветов униформы по вектору H ; H_a – среднее значение цветовых тонов униформы сотрудника по вектору H ; δ – погрешность, устанавливаемая администратором.

Аналогично рассчитываются диапазоны возможных значений цветов униформы по векторам S , V . При тестировании алгоритма точность распознавания продавца-консультанта составила 87%.

В режиме «работа» алгоритм устанавливает доминирующий цвет уни-

формы и проверяет его вхождение в ранее установленный цветовой диапазон сотрудников. В случае вхождения человек в кадре будет классифицирован как сотрудник магазина, в противном случае – как посетитель.

Основной задачей алгоритма идентификации личности (рис. 6) является установление личности сотрудника магазина или покупателя (личность в привязке к персональным данным) на основе примерных координат лица. Область лица определяется на основе координат ключевых точек (φ_a), после чего область лица передается в нейросетевое решение Face Recognition [13; 16] для идентификации личности [17]. Результатом работы алгоритма является информация о личности человека.

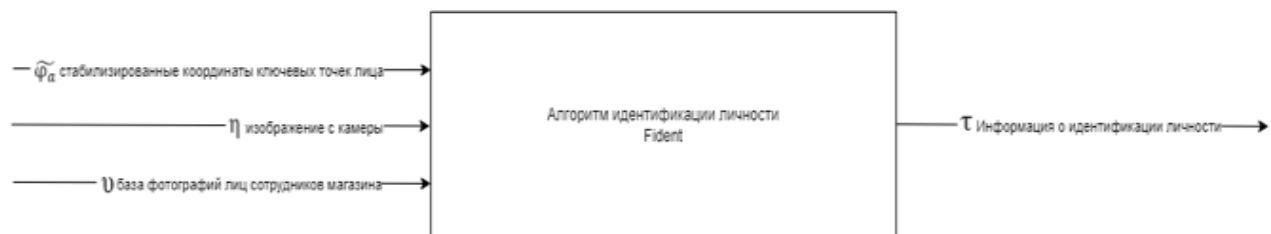


Рис. 6. Контекстная диаграмма работы алгоритма идентификации личности

Fig. 6. Contextual diagram of the identity identification algorithm



Рис. 7. Контекстная диаграмма работы алгоритма межкамерного и межкадрового трекинга

Fig. 7. Contextual diagram of the operation of the inter-camera and inter-frame tracking algorithm

Алгоритм межкамерного и межкадрового трекинга (рис. 7) предназначен для определения контроля перемещения сотрудника и клиента по помещению [18; 19]. Работа алгоритма базируется на информации, полученной с алгоритма стабилизации ключевых точек ($\tilde{\omega}_j$), на основе которых производится расчет области туловища и ног человека. После чего такие области делятся на сегменты, в каждом сегменте определяется доминирующий цвет. Формируется цветовой диапазон путем отложения влево и вправо по осям HSV константы, таким образом будут получены левая и правая координаты цветового диапазона по каждой из осей. Такие цветовые диапазоны сохраняются в памяти.

После получения нового кадра алгоритм также определяет области, делит их на сегменты, и в каждом сегменте устанавливается доминирующий цвет. После высчитывается процент вхождения каждого установленного доминирующего цвета в ранее определенные цветовые диапазоны. Если процент такого вхождения 80% и более, то считается, что межкадровое сведение успешно выполнено.

Рассмотрим метод контроля взаимодействия сотрудника и покупателя (рис. 8). Все алгоритмы описываемого метода работают в параллельном режиме и на вход получают информацию с нейросетевого решения для определения позы человека.

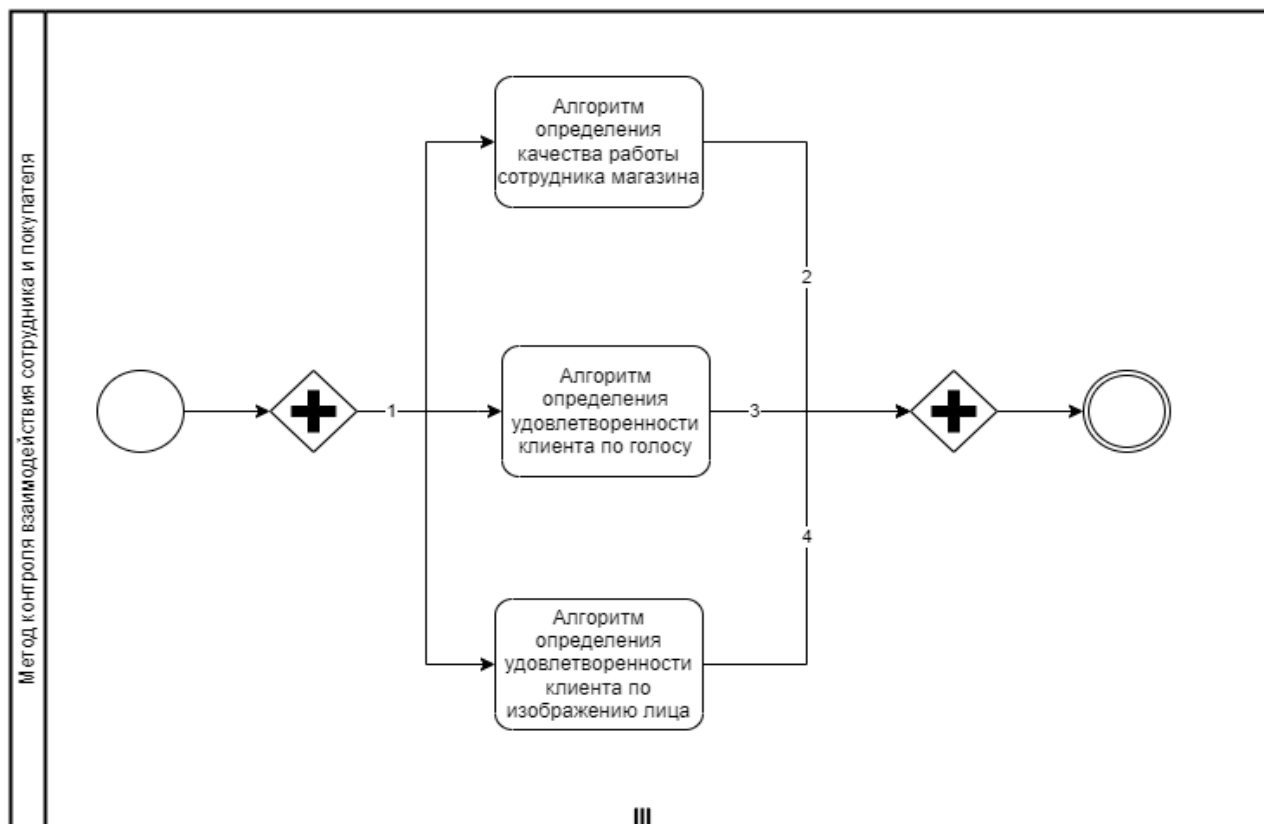


Рис. 8. BPMN-диаграмма метода контроля взаимодействия сотрудника и покупателя

Fig. 8. BPMN-diagram of the employee-buyer interaction control method

Алгоритм определения качества работы сотрудника более подробно описан в исследовании [15]. Кратко говоря, принцип его работы базируется на анализе местонахождения сотрудника в тот или иной момент времени и его расположения относительно посетителя. Если он находится на определенном расстоя-

нии с клиентом (оно задается администратором), то вычисляются «углы обзора» посетителя и сотрудника, мера их пересечения и время взаимодействия. На основании этих данных делается вывод о качестве работы сотрудника. Подробнее о входных и выходных данных алгоритма можно посмотреть ниже (рис. 9).

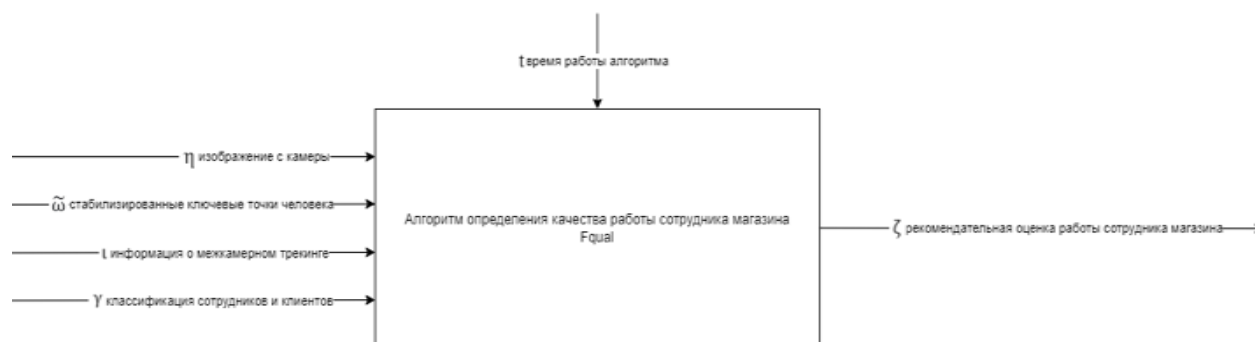


Рис. 9. Контекстная диаграмма работы алгоритма определения качества работы сотрудника

Fig. 9. Contextual diagram of the algorithm for determining the quality of an employee's work

Алгоритм определения удовлетворённости клиента по голосу (рис. 10) подробно описан в [15; 20]. Когда посетитель находится у кассы, нейронная сеть обрабатывает аудиопоток его голоса и

делается вывод о качестве работы сотрудника и удовлетворенности клиента. (Подробнее о входных и выходных данных работы алгоритма можно увидеть на рис. 12.)

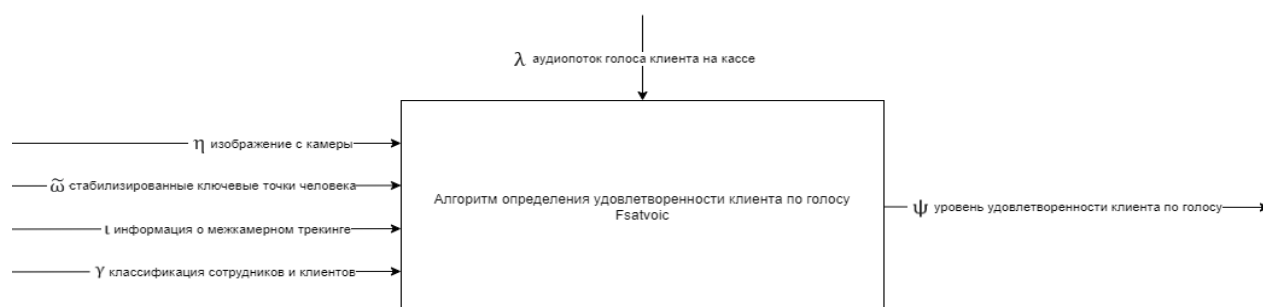


Рис. 10. Контекстная диаграмма работы алгоритма определения удовлетворенности клиента по голосу

Fig. 10. Contextual diagram of the algorithm for determining customer satisfaction by voice

Алгоритм определения удовлетворенности клиента с использованием видеоизображения лица представляет собой анализ изображения лица, полученного благодаря использованию камеры, размещенной у выхода. В результате работы данного алгоритма и благодаря

использованию нейросетевых решений определяется настроение покупателя, исходя из которого устанавливается его удовлетворенность.

Рассмотрим входные и выходные данные работы описываемого алгоритма можно увидеть на (рис. 11).

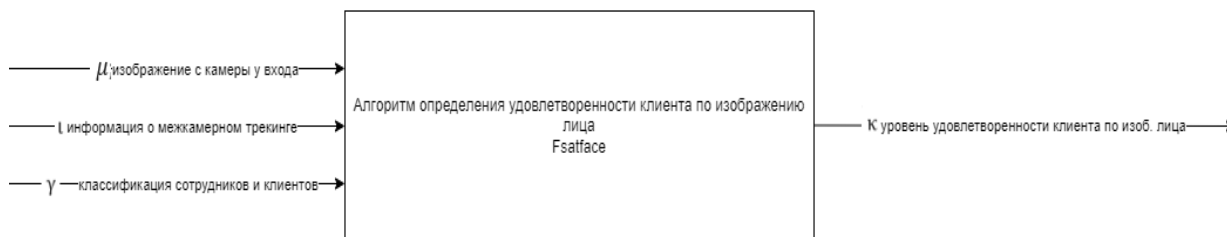


Рис. 11. Контекстная диаграмма работы алгоритма определения удовлетворенности клиента по изображению лица

Fig. 11. Contextual diagram of the algorithm for determining customer satisfaction from a face image

На рисунках 12, 13 представлен **метод аккумуляирования и консолидации** данных. Основной задачей метода является сбор и анализ данных со всех

методов для установления связей и вычисления рекомендательной оценки работы сотрудника.

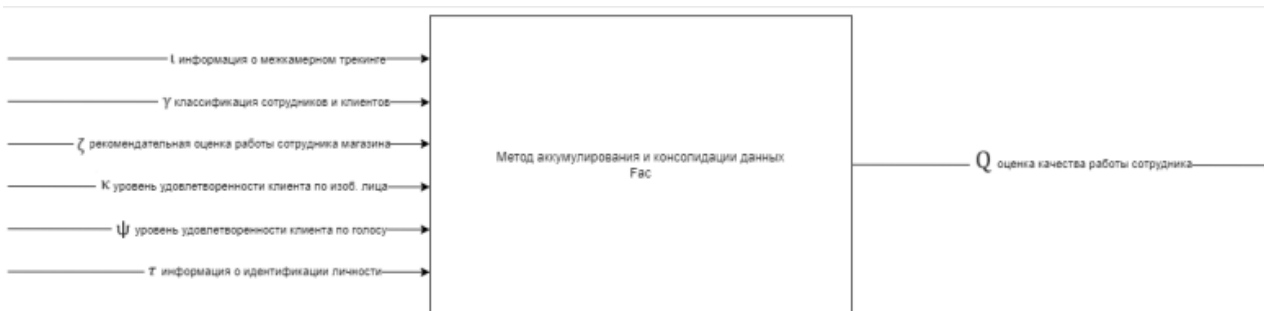


Рис. 12. Контекстная диаграмма работы метода аккумуляирования и консолидации данных

Fig. 12. Contextual diagram of the data accumulation and consolidation method

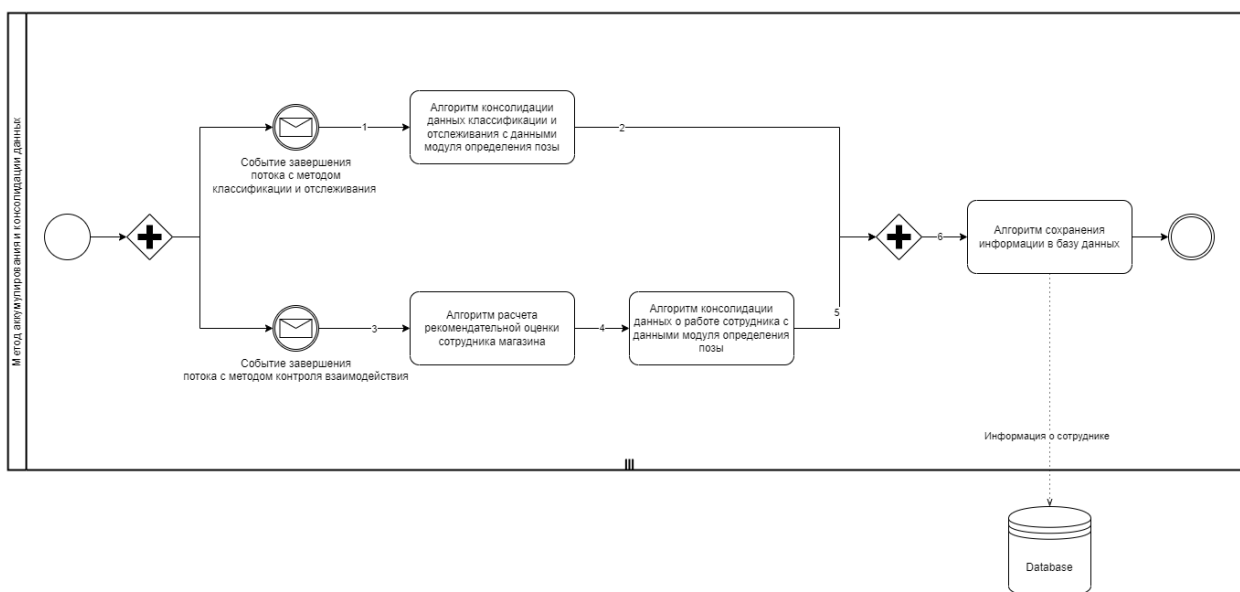


Рис. 13. Метод аккумуляирования и консолидации данных (BPMN-диаграмма)

Fig. 13. Data accumulation and consolidation method (BPMN-diagram)

Алгоритм консолидации данных классификации и отслеживания начинают свою работу после события о завершении потока с методом классификации и отслеживания (рис. 12). Указанный алгоритм необходим для установления связей между алгоритмами межкамерного и межкадрового трекинга, идентификации личности и алгоритмами классификации для привязки вычисленной информации к человеку в помещении. Связь устанавливается за счет фундаментальных данных – информации о ключевых точках. Данные, передаваемые в различные методы, содержат информацию о привязке к человеку в кадре. Указанный алгоритм собирает эти данные и осуществляет итоговую привязку к человеку в кадре. Выходными данными алгоритма является информация о человеке с данными о его принадлежности к посетителям, его перемещении и его личности (рис. 12).

Алгоритм расчета рекомендательной оценки сотрудника начинает свою работу после события завершения потока с методом контроля взаимодействия сотрудника и покупателя. Задачами алгоритма являются вычисления рекомендательной оценки сотрудника, основываясь на данные с алгоритмов определения качества работы сотрудника магазина, определения удовлетворенности клиента по голосу, удовлетворенности клиента по лицу. Вычисляется путем вычисления средней оценки из информации, полученной с других методов и алгоритмов. Рекомендательная оценка взаимодействия высчитывается

из времени проведения сотрудника рядом с клиентом и времени, которое его взгляд был направлен в сторону клиента (значения корректируются администратором).

После вышеописанного алгоритма данные в параллельном режиме передаются в *алгоритм консолидации данных о работе сотрудника с данными модуля определения позы*. В рассматриваемом алгоритме данные консолидируются с информацией нейросетевого решения для определения позы человека. Таким образом, осуществляется привязка всей входной информации к рассматриваемому человеку на изображении. Выходной информацией является рекомендательная оценка сотруднику магазина по результатам его взаимодействия с клиентом.

Алгоритм сохранения информации в базу данных предназначен для сохранения информации о работе сотрудника с привязкой ко времени.

Результаты и их обсуждение

Разработаны метод классификации и отслеживания перемещения сотрудников и посетителей на видеоизображении, алгоритмы межкамерного и межкадрового трекинга, стабилизации ключевых точек, классификации и идентификации личности.

Разработаны метод контроля уровня взаимодействия сотрудника и посетителя на видеоизображении, алгоритмы определения качества работы сотрудника, определения удовлетворенности сотрудника по голосу и лицу.

Таким образом, разработанные модели и алгоритмы позволят качественно улучшить работу продавца-консультанта и, как следствие, приведут к улучшению клиентоориентированности бизнеса.

Полученные в данной статье методы и алгоритмы позволяют в режиме реального времени распознать клиента и сотрудника, а также определить уровень удовлетворенности клиента сразу в момент покупки, в то время как большинство аналогичных методов [6; 7; 8] предполагают последующую обработку данных по средствам опросов. Разработанные методики позволяют узнать, чем удовлетворен и чем не удовлетворен клиент в данный момент, т. е. оценить влияние на совершение покупки и впечатление от оказанного сервиса в краткосрочной перспективе (а значит, выделить больше причин удовлетворенности или неудовлетворенности клиентом), в то время как другие методы изучают удовлетворенность клиента в долгосрочной перспективе: уже по прошествии значительного периода времени (т. е. фактически изучают самое сильное впечатление о сервисе, которое осталось в памяти по прошествии времени). Следовательно, полученные алгоритмы позволяют совершенствовать предоставляемые услуги, не дожидаясь обработки опросов, а в режиме реального времени.

Выводы

В статье была кратко проанализирована текущая ситуация в сфере анализа удовлетворенности клиента предоставляемым сервисом услуг, а также в сфере отслеживания действий персонала и покупателей. Также на данный момент отсутствуют методы автоматической оценки удовлетворенности клиента в режиме реального времени, аналоги сосредоточены на последующей обработке, полученной посредством опросов информации. Был сделан вывод об отсутствии необходимого решения, вследствие чего поставлена цель, посвященная разработке методов и моделей распознавания и контроля действий посетителей и сотрудников по средствам интеллектуального анализа данных, полученных с камер.

Были спроектированы и разработаны методы для распознавания сотрудников и покупателей по видеоизображению с модулем идентификации личности и межкамерным трекингом, а также алгоритмы, позволяющие определить уровень качества обслуживания посетителей в текущий момент времени.

В дальнейшем планируется использовать разработанные методы, модели и алгоритмы для реализации программного решения, которое позволит повысить уровень предоставляемого сервиса и протестировать их работу путем внедрения в действующие магазины и торговые точки.

Список литературы

1. Ульянова О. А. Психологические особенности продавцов-консультантов сетевого маркетинга // Вестник Самарской гуманитарной академии. Серия: Психология. 2013. № 1 (13). С. 27–41.

2. Ashkanani A., Sobhy A., Naghavipour H. A Design Approach of Automatic Visitor Counting System Using Video Camera // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2015, no. 10, pp. 62–67. <https://doi.org/10.9790/1676-10216267>.
3. Herviana A., Sudiharto D., Yulianto F. The Prototype of In-Store Visitor and People Passing Counters using Single Shot Detector Performed by OpenCV // 2020. 1st International Conference on Information Technology, Advanced Mechanical and Electrical Engineering (ICITAMEE). Yogyakarta: IEEE, 2021. P. 169–174. <https://doi.org/10.1109/ICITAMEE50454.2020.9398507>.
4. Hassaan A., Dessouky M., El-Sayed A. A new approach for crowd counting and individuals detection using thermal video // 36th National Radio Science Conference. Aswau, Egypt: Arab Academy for Science Technology and Maritime Transport, 2019.
5. Image processing and artificial neural network for counting people inside public transport / P. Chato, D. J. Chipantasi, N. Velasco, S. Rea, V. Hallo, P. Constante // 2018 IEEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM). Cuenca, Ecuador: IEEE, 2018. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ETCM.2018.8580287>.
6. An empirical research on customer satisfaction study: a consideration of different levels of performance / YC. Lee, YC. Wang, SC. Lu [et al.] // SpringerPlus. 2019. N 5. P. 1577. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3208-z>.
7. Assessment of the satisfaction with public health insurance programs by patients with chronic diseases in China: a structural equation modeling approach / J. Geng, X. Chen, J. Shi [et al.] // BMC Public Health. 2021. N 21. P. 1886. <https://doi.org/10.1186/s12889-021-11947-7>.
8. Customer satisfaction analysis of the healthy elderly to investigate the association among happiness, health status, and well-being using the Happiness & Health Feeling Scale / K. Teraoka [et al.] // Journal of Physical Therapy Science. 2019. N 31(10). P. 751–754. <https://doi.org/10.1589/jpts.31.751>.
9. A Framework for Understanding and Managing the Customer Experience / A. De Keyser [et al.] // Marketing Science Institute Working Paper Series. 2015. N 49.
10. Капленко Г. В. О вероятностном характере прогнозирования покупательского спроса на основе данных сплошного наблюдения // БІЗНЕСІНФОРМ. 2014. № 8. С. 228–232.
11. About quantifying small color differences in digital images / I. Palchikova, E. Smirnov [et al.] // Computer Optics. 2020. N 44(4). P. 606–617. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-631>.
12. Конаныхин А. Ю. Методы улучшения выделенной области изображения при быстросействующей 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>.
13. Badri I., Sayyouri M. Face Recognition: A Mini-Review // Digital Technologies and Applications. 2013. Cham: Springer, 2023. P. 463–471. https://doi.org/10.1007/978-3-031-29860-8_47.

14. Автоматизированная система для классификации снимков видеопотоков / С. А. Филист, М. В. Шевцов, В. А. Белозеров [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 4. С. 85–105. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2021-11-4-85-105>.
15. Автоматическая система контроля активности покупателей в магазине с модулями оценки работы его сотрудников / В. Л. Розалиев, А. В. Аболеева-Зотова, А. Д. Ульев [и др.] // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2020. № 2(50). С. 22–32. <https://doi.org/10.21672/2074-1707.2020.50.2.022-032>.
16. Racial Bias within Face Recognition: A Survey / S. Yucer, F. Tektas, N. Al Mou-bayed, Toby Breckon // CC BY-NC-SA 4.0. 2023. N 35. P. 1–35.
17. Singh Bhadauriya S., Kushwaha S., Meena S. Real-Time Face Detection and Face Recognition: Study of Approaches // Proceedings of 3rd International Conference on Recent Trends in Machine Learning, IoT, Smart Cities and Applications. Lecture Notes in Networks and Systems. Hyderabad, India, 2023. P. 297–307. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6088-8_27.
18. Multiple Hypothesis Tracking Algorithm for Multi-Target Multi-Camera Tracking with Disjoint Views / K. Yoon [et al.] // CC BY-NC-SA 4.0. 2019. P. 1–10.
19. Distributed multi-camera multi-target association for real-time tracking / S. Yang [et al.] // Scientific Reports. 2022. N 12. P. 11052. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15000-4>.
20. Автоматический контроль уровня оказания услуг продавцом-консультантом / А. Д. Ульев, В. Л. Розалиев, Ю. А. Орлова, А. В. Алексеев // Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века: сборник статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции, проводимой в рамках Пермского естественно-научного форума «Математика и глобальные вызовы XXI века», Пермь, 21–23 мая 2019 года. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2019. Ч. 1. С. 145–149.

References

1. Ul'janova O. A. Psikhologicheskie osobennosti prodavtsov-konsul'tantov se-tevogo marketinga [Psychological characteristics of Network marketing sales consultants]. *Vestnik Samarskoj gumanitarnoj akademii. Seriya: Psihologija = Bulletin of the Samara Humanitarian Academy. Series: Psychology*, 2013, no. 1(13), pp. 27–41.
2. Ashkanani A., Sobhy A., Naghavipour H. A Design Approach of Automatic Visitor Counting System Using Video Camera. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2015, no. 10, pp. 62–67. <https://doi.org/10.9790/1676-10216267>
3. Herviana A., Sudiharto D., Yulianto F. The Prototype of In-Store Visitor and People Passing Counters using Single Shot Detector Performed by OpenCV // 2020. 1st International Conference on Information Technology, Advanced Mechanical and Electrical Engineering

(ICITAMEE). Yogyakarta, IEEE Publ., 2021, pp. 169–174. <https://doi.org/10.1109/ICITAMEE50454.2020.9398507>

4. Hassaan A., Dessouky M., El-Sayed A. A new approach for crowd counting and individuals detection using thermal video. 36th National Radio Science Conference. Aswau, Egypt, Arab Academy for Science Technology and Maritime Transport, 2019.

5. Chato P., Chipantasi D. J., Velasco N., Rea S., Hallo V., Constante P. Image processing and artificial neural network for counting people inside public transport. 2018 IEEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM). Cuenca, Ecuador, IEEE Publ., 2018, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ETCM.2018.8580287>.

6. Lee YC., Wang YC., Lu SC., eds. An empirical research on customer satisfaction study: a consideration of different levels of performance. *SpringerPlus*, 2019, no. 5, p. 1577. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3208-z>

7. Geng J., Chen X., Shi J., eds. Assessment of the satisfaction with public health insurance programs by patients with chronic diseases in China: a structural equation modeling approach. *BMC Public Health*, 2021, no. 21, p. 1886. <https://doi.org/10.1186/s12889-021-11947-7>

8. Teraoka K., eds. Customer satisfaction analysis of the healthy elderly to investigate the association among happiness, health status, and well-being using the Happiness & Health Feeling Scale. *Journal of Physical Therapy Science*, 2019, no. 31(10), pp. 751–754. <https://doi.org/10.1589/jpts.31.751>

9. De Keyser A., eds. A Framework for Understanding and Managing the Customer Experience. *Marketing Science Institute Working Paper Series*, 2015, no. 49.

10. Kaplenko G. V. O veroyatnostnom kharaktere prognozirovaniya pokupatel'-skogo sprosa na osnove dannykh sploshnogo nablyudeniya [On the probabilistic nature of forecasting consumer demand based on continuous observation data]. *BIZNESINFORM*, 2014, no. 8, pp. 228–232.

11. Palchikova I., Smirnov E., eds. About quantifying small color differences in digital images. *Computer Optics*, 2020, no. 44(4), pp. 606–617. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-631>

12. Konanyhin A. Ju. Metody uluchsheniya vydelennoi oblasti izobrazheniya pri bystro-deistvuyushchei obrabotke simvol'noi informatsii [Methods for improving the selected image area with high-speed processing of symbolic information]. *Izvestiya Jugo-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>

13. Badri I., Sayyouri M. Face Recognition: A Mini-Review // Digital Technologies and Applications. 2013. Cham, Springer Publ., 2023, pp. 463–471. https://doi.org/10.1007/978-3-031-29860-8_47

14. Filist S. A., Shevcov M. V., Belozerov V. A., eds. Avtomatizirovannaya sistema dlya klassifikatsii snimkov videopotokov [Automated system for classifying images of video

streams]. *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 85–105. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2021-11-4-85-105>

15. Rozaliev V. L., Zaboлева-Zotova A. V., Ul'ev A. D., eds. Avtomaticheskaya sistema kontrolya aktivnosti pokupatelei v magazine s mo-dulyami otsenki raboty ego sotrudnikov [An automatic system for monitoring the activity of customers in the store with modules for evaluating the work of its employees]. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2020, no. 2(50), pp. 22–32. <https://doi.org/10.21672/2074-1707.2020.50.2.022-032>

16. Yucer S., Tektas F., Al Moubayed N., Breckon Toby. Racial Bias within Face Recognition: A Survey. *CC BY-NC-SA 4.0*, 2023, no. 35, pp. 1–35.

17. Singh Bhadauriya S., Kushwaha S., Meena S. Real-Time Face Detection and Face Recognition: Study of Approaches. *Proceedings of 3rd International Conference on Recent Trends in Machine Learning, IoT, Smart Cities and Applications. Lecture Notes in Networks and Systems*. Hyderabad, India, 2023, pp. 297–307. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6088-8_27

18. Yoon K., eds. Multiple Hypothesis Tracking Algorithm for Multi-Target Multi-Camera Tracking with Disjoint Views. *CC BY-NC-SA 4.0*, 2019, pp. 1–10.

19. Yang S., eds. Distributed multi-camera multi-target association for real-time tracking. *Scientific Reports*, 2022, no. 12, p. 11052. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15000-4>

20. Ul'ev A. D., Rozaliev V. L., Orlova Ju. A., Alekseev A. V. [Automatic control of the level of services rendered by the sales consultant]. *Iskusstvennyj intellekt v reshenii aktual'nyh social'nyh i jekonomicheskikh problem XXI veka. Sbornik statej po materialam Chetvertoj vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, provodimoj v ramkah Permskogo estestvennonauchnogo foruma "Matematika i global'nye vyzovy XXI veka"* [Artificial intelligence in solving urgent social and economic problems of the XXI century. A collection of articles based on materials in the IV All-Russian scientific and practical conference held within the Perm Natural Science Forum "Mathematics and Global Challenges of the XXI century"]. Perm: Perm State National Research University Publ., 2019, pt. 1, pp. 145–149. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Ульев Андрей Дмитриевич, аспирант,
Волгоградский технический
государственный университет,
г. Волгоград, Российская Федерация,
e-mail: ulyev-ad@yandex.ru,
ORCID: 0009-0009-9832-1593

Andrey D. Ulyev, Post-Graduate Student,
Volgograd State Technical University,
Volgograd, Russian Federation,
e-mail: ulyev-ad@yandex.ru,
ORCID: 0009-0009-9832-1593

Донская Анастасия Романовна, аспирант,
Волгоградский технический
государственный университет,
г. Волгоград, Российская Федерация,
e-mail: donsckaia.anastasiya@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-3086-4929

Anastasia R. Donsckaia, Post-Graduate Student,
Volgograd State Technical University,
Volgograd, Russian Federation,
e-mail: donsckaia.anastasiya@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-3086-4929

Зубков Александр Владимирович, аспирант,
Волгоградский технический
государственный университет,
г. Волгоград, Российская Федерация,
e-mail: zubkov.alexander.v@gmail.com,
ORCID: 0000-0003-0425-5695

Alexander V. Zubkov, Post-Graduate Student,
Volgograd State Technical University,
Volgograd, Russian Federation,
e-mail: zubkov.alexander.v@gmail.com,
ORCID: 0000-0003-0425-5695

Оценка эффективности контроля технического состояния сложного технического объекта с учетом экспертных оценок

С. А. Нестерович¹, А. Н. Брежнева² ✉

¹ Московский государственный университет технологий и управлений
имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет)
ул. Земляной Вал, д. 73, г. Москва 109004, Российская Федерация

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

✉ e-mail: brezhneva.an@rea.ru

Резюме

Цель исследований – разработать метод оценки эффективности контроля технического состояния сложного технического объекта с учетом экспертных оценок.

Методы. Оценка эффективности применения сложного технического объекта производится с помощью соответствующих показателей эффективности, характеризующих степень выполнения поставленных перед ними задач. При выборе показателей эффективности необходимо учитывать следующие основные требования: показатель должен иметь количественное выражение и достаточно просто вычисляться; показатель должен выбираться с учетом специфики решаемой задачи и отражать основные характеристики оцениваемого явления; показатель должен быть представительным и обеспечивать сравнимость результатов оценки по степени предпочтительности, т. е. не допускать несравнимых (индифферентных) решений.

Результаты. Представлен метод оценки эффективности контроля технического состояния сложного технического объекта с учетом дополнительного расширенного информационного описания качественными признаками (экспертными оценками).

Заключение. Эффективность контроля напрямую зависит от точности, полноты контроля. Точность существующих систем контроля достаточно высокая, но полнота контроля не всегда учитывает качественные (экспертные) оценки об объекте контроля. Повышение эффективности систем контроля должно идти не только за счет точности и быстродействия, но и за счет полноты контроля. В качестве критерия оценки эффективности системы контроля предложена оценка вероятности работоспособного состояния, контролируемого сложного технического объекта. Предложен расчет эффективности системы контроля с учетом дополнительного расширенного информационного описания качественными признаками (экспертными оценками) об объекте контроля. Показано, что можно более точно оценить работоспособное состояние объекта контроля, если будет выше полнота контроля, при неснижаемой точности контроля.

Ключевые слова: вероятность принятия правильного решения; диагностика; достоверность контроля; информационное описание; количественные параметры; ошибка первого и второго рода; полнота контроля; сложный технический объект; техническое состояние; экспертные оценки качественных признаков; эффективность.

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

Для цитирования: Нестерович С. А., Брежнева А. Н. Оценка эффективности контроля технического состояния сложного технического объекта с учетом экспертных оценок // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 65–75. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-65-75>.

Поступила в редакцию 10.04.2023

Подписана в печать 05.05.2023

Опубликована 30.06.2023

Assessment of the Effectiveness of Monitoring the Technical Condition of a Complex Technical Object, Taking Into Account Expert Assessments

Sergey A. Nesterovich¹, Aleksandra N. Brezhneva² ✉

¹ Moscow State University of Technology and Management (First Cossack University)
73 Zemlyanoy Val Str., Moscow 109004, Russian Federation

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

✉ e-mail: brezhneva.an@rea.ru

Abstract

The purpose of the research is to develop a method for evaluating the effectiveness of monitoring the technical condition of a complex technical object, taking into account expert assessments.

Methods. Evaluation of the effectiveness of the application of a complex technical object is carried out with the help of appropriate performance indicators that characterize the degree of fulfillment of the tasks assigned to them. When choosing performance indicators, the following basic requirements should be taken into account: the indicator should have a quantitative expression and be calculated simply enough; the indicator should be selected taking into account the specifics of the task being solved and reflect the main characteristics of the phenomenon being evaluated; the indicator should be representative and ensure comparability of the evaluation results by the degree of preference, i.e. to prevent incomparable (indifferent) decisions.

Results. A method for evaluating the effectiveness of monitoring the technical condition of a complex technical object is presented, taking into account an additional expanded information description with qualitative features (expert assessments).

Conclusion. The effectiveness of the control directly depends on the accuracy and completeness of the control. The accuracy of existing control systems is quite high, but the completeness of control does not always take into account qualitative (expert) assessments about the object of control. Improving the efficiency of control systems should go not only at the expense of accuracy and speed, but also at the expense of completeness of control. As a criterion for evaluating the effectiveness of the control system, an assessment of the probability of a functional state of a controlled complex technical object is proposed. The calculation of the effectiveness of the control system is proposed, taking into account the additional expanded information description by qualitative signs (expert assessments) about the object of

control. It is shown that it is possible to more accurately assess the operational state of the object of control if the completeness of control is higher, with an irreducible accuracy of control.

Keywords: probability of making the right decision; diagnostics; reliability of control; information description; quantitative parameters; error of the first and second kind; completeness of control; complex technical object; technical condition; expert assessments of qualitative signs; efficiency.

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

For citation: Nesterovich S. A., Brezhneva A. N. Assessment of the Effectiveness of Monitoring the Technical Condition of a Complex Technical Object, Taking Into Account Expert Assessments. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(2): 65–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-65-75>.

Received 10.04.2023

Accepted 05.05.2023

Published 30.06.2023

Введение

Информационное описание об объекте контроля складывается из количественных показателей и качественных признаков. Количественные показатели обычно получаются с помощью измерительных средств контроля (контрольно-измерительной аппаратуры). Обычно в количественной оценке технического состояния (ТС) сложного технического объекта (СТО) качественные признаки не учитываются. Качественные признаки – это признаки, которые сложно оценить количественно, они оцениваются с помощью экспертных оценок экспертами. Формализацию качественных признаков можно выполнить с помощью математического аппарата нечетких множеств [1; 2]. Поэтому, если система контроля, не снижая точности и полноты (глубины) контроля, сможет оценивать не только количественные параметры, но и качественные признаки, тогда система контроля будет лучше, так как информационное описание об объекте контроля будет шире, а значит, объём данных контролируемой информации будет больше, чем только при количественном методе. Одним из важнейших показате-

лей системы контроля является достоверность [3; 4]. Достоверность контроля есть степень доверия к принимаемым решениям в процессе контроля и определяется мерой их определённости после контроля объекта [5; 6; 7]. В качестве показателя достоверности используется вероятность принятия правильного решения по результатам контроля [8]. Как известно, достоверность контроля зависит от точности и объема контролируемые параметров, и чем больше объем контролируемых параметров, тем выше достоверность контроля [4; 9; 10; 11]. Тогда можно утверждать, что более точная оценка технического состояния СТО будет напрямую зависеть от полноты контроля при заданной точности контроля.

Материалы и методы

Оценка эффективности применения СТО производится с помощью соответствующих показателей эффективности, характеризующих степень выполнения поставленных перед СТО задач.

При выборе показателя эффективности необходимо учитывать следующие основные требования [12; 13]:

– показатель должен иметь количественное выражение и достаточно просто вычисляться;

– показатель должен выбираться с учетом специфики решаемой задачи и отражать основные характеристики оцениваемого явления;

– показатель должен быть представительным (удовлетворять принципу: большому значению показателя соответствует лучший вариант решения) и обеспечивать сравнимость результатов оценки по степени предпочтительности, т. е. не допускать несравнимых (индифферентных) решений.

В зависимости от цели действий в качестве показателя эффективности обычно используется или вероятность

какого-то события, или математическое ожидание некоторой случайной величины.

Для определения качества работы алгоритма распознавания ТС СТО воспользуемся методикой оценки эффективности распознающих систем, предложенной в [4] и основанной на методе статистических испытаний. Согласно данной методике, в качестве значения $\gamma_{\text{расп}}$ примем вероятность получения правильных решений при распознавании образов, относящихся к различным классам. Функциональная схема модели оценки показателя $\gamma_{\text{расп}}$ эффективности алгоритма распознавания технического состояния (ТС) представлена ниже (рис. 1).

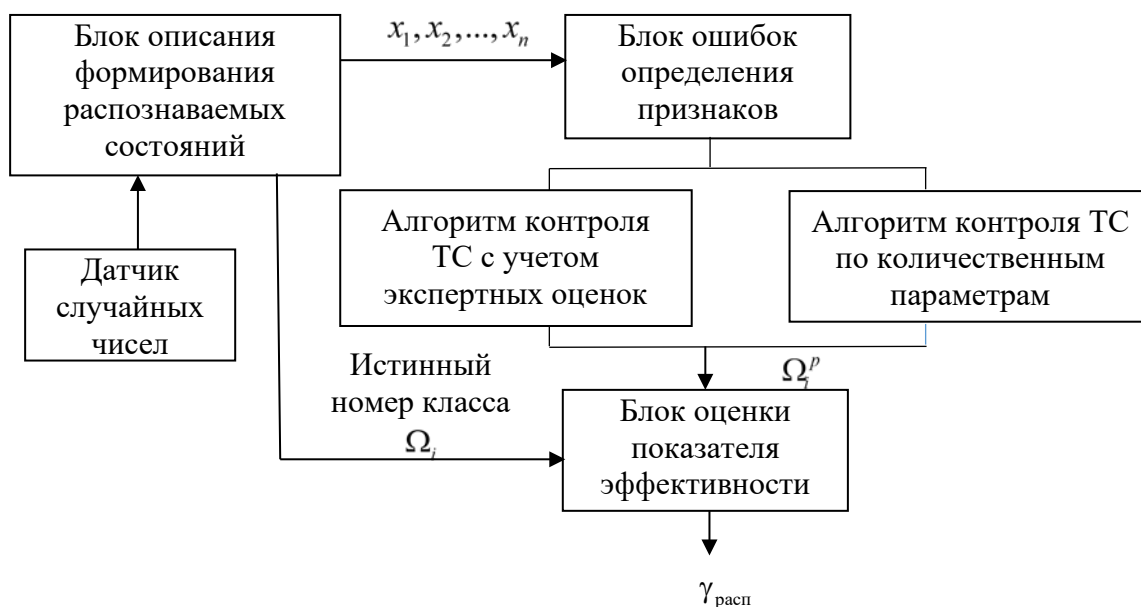


Рис. 1. Функциональная схема модели оценки показателя эффективности алгоритма распознавания ТС

Fig. 1. Functional diagram of the model for evaluating the effectiveness of the vehicle recognition algorithm

Пусть имеется m классов групп технического состояния, которые необходимо распознать и которые образуют множество $\Omega = \{\Omega_i\}$. На основе имеющихся значений признаков x_1, x_2, \dots, x_n

(измеренных с помощью информационных средств контроля или полученных иным способом) формируются описания объектов, составляющих описание ТС объекта контроля и принадлежность которых к определенному классу заранее

известна. Датчик случайных чисел позволяет выбирать заранее известное ТС случайным образом из имеющейся выборки. С помощью блока ошибок определения признаков значения x_1, x_2, \dots, x_n подвергаются случайному искажению, имитирующему неточность определения значений признаков. Возникающие неточности и неопределенности обусловлены точностными характеристиками информационной системы контроля и неполнотой имеющихся сведений о ОК в условиях эксплуатации, а также воздействием различного рода ошибок [12].

В результате воздействия ошибок формируются искаженные значения признаков $x'_i = x_i + \xi_i$,

где ξ_i – ошибка определения значения признака x_i .

Искаженные значения признаков поступают на вход алгоритма распознавания ТС, который определяет принадлежность объектов к тому или иному классу из множества $\Omega = \{\Omega_i\}$ $i = 1, 2, \dots, m$. Блок оценки показателя эффективности сопоставляет номер класса Ω_i , к которому отнесен объект алгоритма распознавания, с «истинным» номером, т. е. с тем, который задавался блоком формирования описаний распознаваемых ситуаций, определяет правильность распознавания объекта и запоминает полученный результат. Затем заново формируется описание случайно выбранной ситуации, которая должна быть распознана алгоритмом распознавания, и описанная выше процедура

определения правильности распознавания повторяется.

Число испытаний N определяется доверительной вероятностью. Пусть ε – доверительный интервал, γ^i – вероятность принятия правильного решения годен для i -го класса, $\gamma_{\text{расп}}^i$ – вероятности правильного распознавания объектов i -го класса, а α – доверительная вероятность. Тогда число испытаний, необходимое для того, чтобы вероятность отклонения оценки величины γ^i от своего истинного значения $\gamma_{\text{расп}}^i$ меньше, чем на $2\Delta_\alpha$, была равна α , можно определить по формуле [14]

$$N = \frac{\gamma_{\text{расп}}^i (1 - \gamma_{\text{расп}}^i)}{\Delta_\alpha^2} \left[\Phi_o^{-1} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right]^2, \quad (1)$$

где $\Phi_o^{-1}(\bullet)$ – обратная функция Лапласа.

При правильном распознавании ставилась «1», а при неправильном – «0».

Рассчитаем доверительный интервал для полученных оценок вероятности принятия правильного решения об отказе ОК по формуле [3; 13; 14]

$$\Delta_\alpha \Phi_o^{-1} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \sqrt{\frac{\gamma^* q^*}{n}}, \quad (2)$$

где α – доверительная вероятность оценки; γ^* – оценка вероятности правильного распознавания ТС;

$$q^* = 1 - \gamma^*;$$

n – число испытаний.

Обозначим N^i – общее количество испытаний оценки ТС, в которых имелись объекты из класса Ω , а $N_{\text{пр}}^i$ – число правильных решений. Тогда оценка γ^i правильности распознавания

объектов i -го класса может быть получена по формуле

$$\gamma^i = \frac{N_{\text{пр}}^i}{N^i}. \quad (3)$$

Если априорные вероятности $P(\Omega_i)$ появления объектов из различных классов известны, то безусловная вероятность правильного решения задачи распознавания алгоритмом распознавания ТС может быть вычислена по формуле

$$\gamma_{\text{расп}} = \sum_{i=1}^m \gamma^i P(\Omega_i), \quad (4)$$

где m – число классов.

Важным показателем эффективности контроля является его достоверность.

Достоверность контроля есть мера определенности его результатов. На достоверность контроля и качество принимаемых решений значительно влияет полнота (глубина) контроля изделия с точки зрения проверки всех его конструктивных элементов.

Результаты и их обсуждение

Методика расчета достоверности ТС СТО подробно изложена в [6; 10; 15].

Расчет достоверности результатов контроля по количественным (n) параметрам осуществляется по формуле (5), а с учетом качественных (k) признаков – по формуле (6):

$$D_n = 1 - \prod_{i=1}^n (\alpha'_i + \gamma'_i) \prod_{i=n+1}^d P_i - \prod_{i=1}^n (\beta'_i + \gamma'_i) + 2 \prod_{i=1}^n \gamma'_i \prod_{i=n+1}^d P_i, \quad (5)$$

$$D_{n+k} = 1 - \prod_{i=1}^n (\alpha'_i + \gamma'_i) = \prod_{i=n+1}^d P_i \prod_{j=1}^k \gamma_j^* - \prod_{i=1}^n (\beta'_i + \gamma'_i) \prod_{j=1}^k \gamma_j^* + 2 \prod_{i=1}^n \gamma'_i \prod_{j=1}^k \gamma_j^* \prod_{i=n+1}^d P_i, \quad (6)$$

где D_n – достоверность результата контроля с существующими средствами контроля; D_{n+k} – достоверность результата контроля с помощью дополнительных экспертных оценок; α'_i – ошибка 1-го рода (вероятность ложного отказа) по i -му количественному параметру; β'_i – ошибка 2-го рода (вероятность не обнаружения отказа) по i -му количественному параметру; P_i – априорная вероятность исправного состояния по i -му параметру; γ'_i – вероятность принятия правильного решения (годен) по i -му качественному признаку; γ_j^* – вероятность принятия правильного решения (годен) по j -му качественному признаку; d – общее количество количественных параметров и качественных признаков, участвующих в контроле; $i = \overline{1, n}$ количество количественных контролируемых параметров; $j = \overline{1, k}$ количество качественных контролируемых параметров;

Расчет ошибок α'_i и β'_i можно произвести на основе методики, предложенной в [12].

Значения α'_i и β'_i рассчитываются по графикам, приведенным на рисунке 2 и 3, для случая, когда закон распределения параметра и закон распределения погрешности измерения являются нормальными.

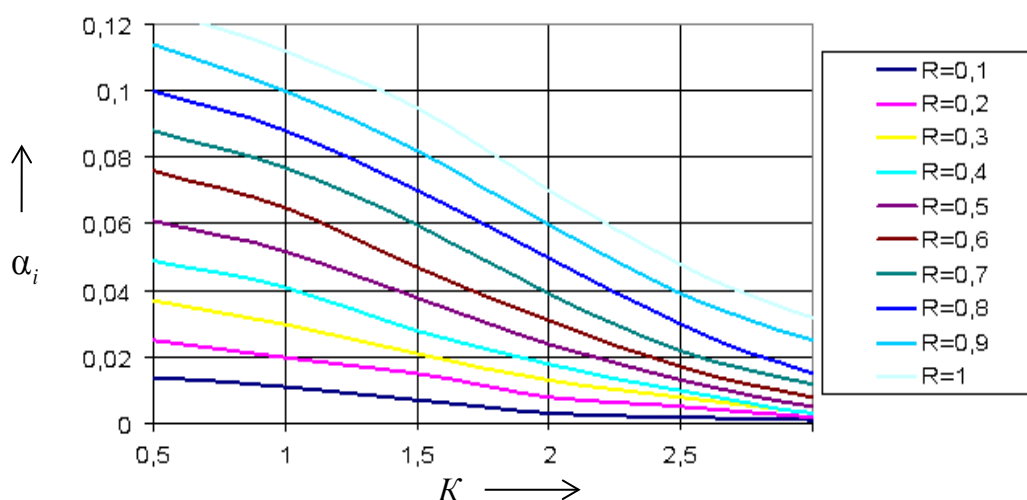


Рис. 2. Графики для определения условных вероятностей ложных отказов (отклонения контролируемых параметров и погрешности измерения распределены по нормальному закону)

Fig. 2. Graphs for determining conditional probabilities of false failures (deviations of controlled parameters and measurement errors are distributed according to the normal law)

В случае, когда законы распределения параметра и погрешности его измерения неизвестны, их рекомендуется

определять путем анализа факторов, формирующих отклонения параметра (погрешности измерения).

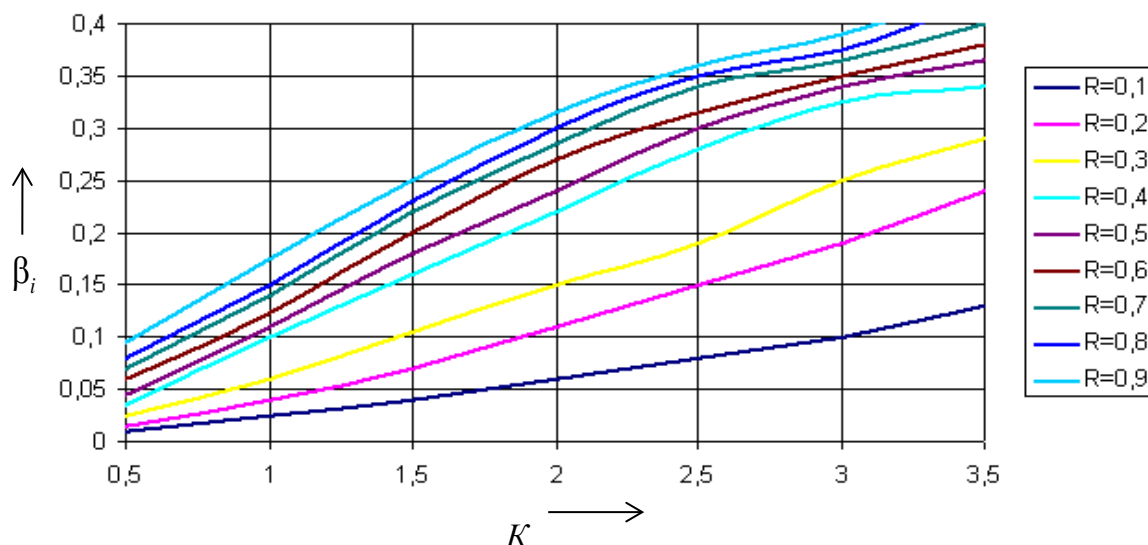


Рис. 3. Графики для определения условных вероятностей необнаруженных отказов

Fig. 3. Graphs for determining conditional probabilities of undetected failures

Если число факторов более пяти и ни одному из них нельзя отдать предпочтение, то закон распределения следует принимать нормальным. Если эти условия не выполняются, то закон распределения следует принимать равномерным.

Под факторами следует понимать причины отклонения параметра (погрешности измерения) от номинального значения, например реальный разброс характеристик элементов ОК:

– изменение напряжений питания;

– изменение внешних условий (давления, температуры, влажности, освещенности, цвета индикаторов, электромагнитных излучений и т. д.);

– временной дрейф параметра и др.

Зная достоверность контроля, можно определить вероятность работоспособного состояния P^* СТО среди годных параметров [16; 17; 18; 19]:

$$P^* = \frac{pD}{1 - v(1 - p)}, \quad (7)$$

где v – полнота контроля; P – априорная вероятность работоспособного состояния.

Если принять некоторые заданные достоверности и априорные вероятности работоспособного состояния, то можно рассчитать вероятность работоспособного ТС СТО (рис. 4).

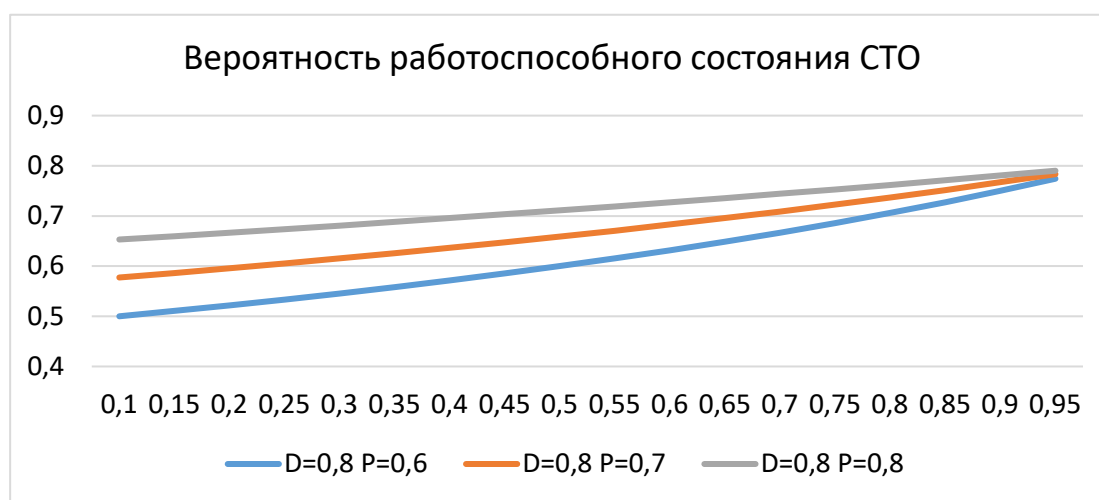


Рис. 4. Вероятность работоспособного состояния в зависимости от полноты контроля

Fig. 4. The probability of a working condition depending on the completeness of the control

Из рисунка 4 видно, что чем выше полнота контроля, тем точнее можно оценить работоспособное техническое состояние объекта.

Аналогично можно рассчитать вероятность исправного, неисправного, неработоспособного и предельного технического состояния.

Выводы

Эффективность контроля напрямую зависит от точности и полноты контроля. Точность существующих систем контроля достаточно высокая, но полнота контроля не всегда учитывает

качественные (экспертные) оценки о СТО. Повышение эффективности систем контроля должно идти не только за счет точности оценки контролируемых параметров, но и за счет полноты контроля. Предложен расчет эффективности системы контроля с учетом дополнительного расширенного информационного описания качественными признаками (экспертными оценками) о СТО. Показано, что более точная оценка технического состояния СТО будет напрямую зависеть от полноты контроля при заданной точности контроля.

Список литературы

1. Леоненко А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БВХ – Петербург, 2005. 736 с.
2. Мелихов А. Н., Берштейн Л. С., Коровин С. Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, Физматлит, 1990. 272 с.
3. Аполлонский С. М. Электромагнитная и функциональная безопасности в сложных технических системах. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2023. 631 с.
4. Гелинг А. К., Матвеев А. С. Введение в математическую теорию обучаемых распознающих систем и нейронных сетей. М.: КноРус, 2017. 395 с.
5. Мороз С. М. Методы обеспечения работоспособного технического состояния автотранспортных средств. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2023. 240 с.
6. Потюпкин А. Ю. Регуляризация задачи контроля состояния сложных технических объектов путем использования дополнительной семантической информации // Измерительная техника. 2010. № 4. С. 41–46.
7. Потюпкин А. Ю., Чечкин А. В. Интеллектуализация сложных технических систем. М.: Военная академия РВСН им. Петра Великого, 2013. 289 с.
8. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1979. 496 с.
9. ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200009481> (дата обращения: 10.03.2023).
10. Технический контроль в машиностроении. Справочник проектировщика / под общей редакцией В. Н. Чупрынина, А. Д. Никифорова. М.: Машиностроение, 1987. 512 с.
11. Шишмарёв В. Ю. Надежность технических систем. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2023. 289 с.
12. Буравлев А. И., Доценко Б. И., Казаков И. Е. Управление техническим состоянием динамических систем / под общ. ред. И. Е. Казакова. М.: Машиностроение, 1995. 240 с.
13. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. 10-е изд., стер. М.: Высшая школа, 2006. 575 с.
14. Гниденко Б. В. Курс теории вероятностей. М.: ЛЕНАНД, 2010. 446 с.
15. Тимошенков С. П., Симонов Б. М., Горошко В. Н. Надежность технических систем и техногенный риск. М.: Юрайт, 2023. 502 с.
16. Евланов Л. Г. Контроль динамических систем. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 432 с.
17. Шишмарёв В. Ю. Диагностика и надежность автоматизированных систем. 2-е изд. М.: Юрайт, 2023. 341 с.
18. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2023. 538 с.

19. Лобанова Н. М., Алтухова Н. Ф. Эффективность информационных технологий. М.: Юрайт, 2023. 237 с.
20. Науменко А. П. НЗ4 Введение в техническую диагностику и неразрушающий контроль / Омский государственный технический университет. Омск, 2019. 152 с.

References

1. Leonenko A. V. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH]. St. Petersburg, BVKh – Petersburg Publ., 2005. 736 p.
2. Melikhov A. N., Bershtein L. S., Korovin S. Ya. Situatsionnye sovetuyushchie sistemy s nechetkoi logikoi [Situational advising systems with fuzzy logic]. Moscow, Nauka, Fizmatlit, 1990. 272 p.
3. Apollonsky S. M. Elektromagnitnaya i funktsional'naya bezopasnosti v slozhnykh tekhnicheskikh sistemakh [Electromagnetic and functional safety in complex technical systems]. 2nd ed. Moscow, Yurayt Publ., 2023. 631 p.
4. Geling A. K., Matveev A. S. Vvedenie v matematicheskuyu teoriyu obuchaemykh raspoznayushchikh sistem i neironnykh setei [Introduction to the mathematical theory of trainable recognition systems and neural networks]. Moscow, KnoRus Publ., 2017. 395 p.
5. Moroz S. M. Metody obespecheniya rabotosposobnogo tekhnicheskogo sostoyaniya avtotransportnykh sredstv [Methods for ensuring the efficient technical condition of vehicles]. 2nd ed. Moscow, Yurayt Publ., 2023. 240 p.
6. Potyupkin A. Yu. Regularizatsiya zadachi kontrolya sostoyaniya slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov putem ispol'zovaniya dopolnitel'noi semanticheskoi informatsii [Regularization of the problem of monitoring the state of complex technical objects by using additional semantic information]. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring Technique*, 2010, no. 4, pp. 41–46.
7. Potyupkin A. Yu., Chechkin A. V. Intellektualizatsiya slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Intellectualization of complex technical systems]. Moscow, Military Academy of the Strategic Missile Forces. Peter the Great Publ., 2013. 289 p.
8. Pugachev V. S. Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 496 p.
9. GOST 20911 – 89. Tekhnicheskaya diagnostika. Terminy i opredeleniya [Technical diagnostics. Terms and definitions]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200009481>. (accessed 10.03.2023)
10. Tekhnicheskii kontrol' v mashinostroenii. Spravochnik proektirovshchika [Technical control in mechanical engineering. Designer's Handbook]; ed. by V. N. Chuprynina, A. D. Nikiforov. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 512 p.
11. Shishmarev V. Yu. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem [Reliability of technical systems]. 2nd ed. Moscow, Yurayt Publ., 2023. 289 p.

12. Buravlev A. I., Dotsenko B. I., Kazakov I. E. Upravlenie tekhnicheskim so-stoyaniem dinamicheskikh sistem [Management of the technical condition of dynamic systems]; ed. by I. E. Kazakova. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 240 p.
13. Wentzel E. S. Teoriya veroyatnostei [Probability theory]. 10th ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2006. 575 p.
14. Gnidenko B. V. Kurs teorii veroyatnostei [Probability theory course]. Moscow, LENAND Publ., 2010. 446 p.
15. Timoshenkov S. P., Simonov B. M., Goroshko V. N. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyi risk [Reliability of technical systems and technogenic risk: textbook and workshop for universities]. Moscow, Yurayt Publ., 2023. 502 p.
16. Evlanov L. G. Kontrol' dinamicheskikh sistem [Control of dynamic systems]. Moscow, Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury Publ., 1979. 432 p.
17. Shishmarev V. Yu. Diagnostika i nadezhnost' avtomatizirovannykh sistem [Diagnostics and reliability of automated systems]. 2nd ed. Moscow, Yurayt Publ., 2023. 341 p.
18. Kremer N. Sh. Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]. 5th ed. Moscow, Yurayt Publ., 2023. 538 p.
19. Lobanova N. M., Altukhova N. F. Effektivnost' informatsionnykh tekhnologii [Efficiency of information technologies]. Moscow, Yurayt Publ., 2023. 237 p.
20. Naumenko A. P. N34 Vvedenie v tekhnicheskuyu diagnostiku i nerazrushayu-shchii kontrol' [N34 Introduction to technical diagnostics and non-destructive testing]. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2019. 152 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Нестерович Сергей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и цифровых технологий, Московский государственный университет технологий и управлений им. К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), г. Москва, Российская Федерация, e-mail: sirial_2005@mail.ru

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

Sergey A. Nesterovich, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Systems and Digital Technologies, Moscow State University of Technologies and Management named after K. G. Razumovsky (First Cossack University), Moscow, Russian Federation, e-mail: sirial_2005@mail.ru

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

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-76-94>



Системный анализ и математическое моделирование инфекционной безопасности заболевания, вызываемого штаммами коронавируса COVID-19

С. Н. Костарев^{1,2,3} ✉, Р. А. Файзрахманов², Н. А. Татарникова¹,
О. В. Новикова¹, Т. Г. Середа¹

¹ Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова
ул. Петропавловская, д. 23, г. Пермь 614990, Российская Федерация

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Комсомольский пр-т, д. 29, г. Пермь 614990, Российская Федерация

³ Пермский институт ФСИН России
ул. Карпинского, д. 125, г. Пермь 614012, Российская Федерация

e-mail: iums@dom.raid.ru

Резюме

Цель исследования заключается в разработке моделей, характеризующих систему «Клетка – Вирус – Среда обитания».

Методы. Способность коронавирусов выходить из клетки без ее апоптоза является важным фактором, обеспечивающим возможность умеренной инфекции. С описанием полного гена 2019-nCoV можно ознакомиться в банке геномов вирусов GenBank: MN908947.3. В настоящее время сведения об эпидемиологии, клинических особенностях, профилактике и лечении данного заболевания изучаются учеными во всем мире.

Теоретические подходы при исследовании были основаны на теории вирусологии, системного анализа, дифференциально-интегрального исчисления и теории вероятности. В качестве материалов выступали показатели иммунограмм за период 2020–2021 гг. по исследованиям влияния коронавирусной инфекции на жителей Пермского края. Данные по активности коронавируса и количеству заболевших жителей брались из открытых источников. Данные о количестве жителей, проживающих в Пермском крае, были взяты из переписи населения. Строение генома SARS-CoV-2 отражено в базе данных GenBank: MN908947.3. Трекер мутаций SARS-CoV-2 изучался по хранилищу: [https://users.math.msu.edu/users/weig/SARS-CoV-2 Mutation Tracker.html](https://users.math.msu.edu/users/weig/SARS-CoV-2%20Mutation%20Tracker.html).

Результаты: разработана и исследована модель «Клетка – Вирус – Среда обитания»; построена система дифференциальных эмпирических уравнений, характеризующих изменения параметров иммунограмм среди подросткового и детского возраста жителей Пермского края; построена и исследована система уравнений Колмогорова, описывающая динамику развития пандемии в Пермском крае.

Заключение. Одной из последствий новой коронавирусной инфекции может явиться изменение в иммунной системе популяции людей. Детальный анализ иммунологического статуса различных расовых групп, различных возрастов и гендерных признаков под влиянием новой коронавирусной инфекции в настоящее время мало изучен.

Ключевые слова: коронавирус; SARS-CoV-2; иммунограмма.

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

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Пермского национального исследовательского политехнического университета в рамках реализации программы деятельности НОЦ мирового уровня «Рациональное недропользование» (соглашение 075-10-2022-11016 от 08.11.2022 г.).

Для цитирования: Системный анализ и математическое моделирование инфекционной безопасности заболевания, вызываемого штаммами коронавируса COVID-19 / С. Н. Костарев, Р. А. Файзрахманов, Н. А. Татарникова, О. В. Новикова, Т. Г. Середина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 76–94. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-76-94>.

Поступила в редакцию 17.04.2023

Подписана в печать 15.05.2023

Опубликована 30.06.2023

System Analysis and Mathematical Modeling of Infection Safety Human Caused by COVID-19 Coronavirus Strains

Sergey N. Kostarev^{1,2,3}✉, Rustam A. Fayzrakhmanov², Natalia A. Tatarnikova¹, Oksana V. Novikova¹, Tatyana G. Sereda¹

¹ Perm State Agrarian-Technological University named after Academician D. N. Pryanishnikov
23 Petropavlovskaja Str., Perm 614990, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University
29 Komsomolski Ave., Perm 614990, Russian Federation

³ Perm Institute of the FPS of Russia
125 Karpinskogo Str., Perm 614012, Russian Federation

✉ e-mail: iums@dom.raid.ru

Abstract

The purpose of research is to develop models characterizing the "Cell–Virus–Habitat" system.

Methods. The ability of coronaviruses to exit the cell without its apoptosis is an important factor providing the possibility of moderate infection. A description of the complete 2019-nCoV gene can be found in the GenBank Virus Genome bank: MN908947.3. Currently, information about the epidemiology, clinical features, prevention and treatment of this disease is being studied by scientists all over the world.

Theoretical approaches in the study were based on the theory of virology, system analysis, differential integral calculus and probability theory. The materials were immunogram indicators for the period 2020–2021. According to studies of the effect of coronavirus infection on residents of the Perm Region. Data on the activity of the coronavirus and the number of sick residents were taken from open sources. Data on the number of residents living in the Perm Region were taken from the population census. The structure of the SARS-CoV-2 genome is reflected in the GenBank database: MN908947.3. The SARS-CoV-2 mutation tracker was studied by the repository: [https://users.math.msu.edu/users/weig/SARS-CoV-2 Mutation Tracker.html](https://users.math.msu.edu/users/weig/SARS-CoV-2%20Mutation%20Tracker.html).

Results: the "Cell–Virus–Habitat" model was developed and investigated; a system of differential empirical equations characterizing changes in immunogram parameters among underage and child-aged residents of the Perm Region was constructed and investigated; a system of Kolmogorov equations describing the dynamics of the pandemic in the Perm Region was constructed and investigated.

Conclusion. One of the consequences of a new coronavirus infection may be a change in the immune system of the human population. A detailed analysis of the immunological status of various racial groups, different ages and gender characteristics under the influence of a new coronavirus infection is currently poorly understood.

Keywords: coronavirus; SARS-CoV-2; immunogram.

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

Funding: This research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the program of activities of the Perm Scientific and Educational Center "Rational Subsoil Use" (agreements 075-10-2022-11016 dated 11/08/2022).

For citation: Kostarev S. N., Fayzrakhmanov R. A., Tatarnikova N. A., Novikova O. V., Sereda T. G. System Analysis and Mathematical Modeling of Infection Safety Human Caused by COVID-19 Coronavirus Strains. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(2): 76–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-76-94>.

Received 17.04.2023

Accepted 15.05.2023

Published 30.06.2023

Введение

В декабре 2019 г. в провинции Wuhan (Ухань) Китайской Народной Республики был зафиксирован новый штамм коронавируса, имеющий первичное название 2019-nCoV. Мировая организация здравоохранения в 2020 г. объявила пандемию и классифицировала новый коронавирус как SARS-CoV-2. Одной из важнейших проблем 2020–2023 гг. является поиск оптимальных методов по созданию средств, повышающих защитные способности организма человека от поражения коронавирусом. Исследования иммунограмм, проводимых во время пандемии, показали значительные отклонения лейкоцитарной формулы крови от нормативных показателей [1]. В 2021–2022 гг. на территории Российской Федерации была проведена вакцинация населения рядом вакцин, созданных в кратчайшие сроки отечественными (российскими) специалистами – вирусологами и иммунологами. Открытые в последнее время штаммы коронавирусов обладают повышенной

трансмиссивностью. Вирус предпочитает атаковать клетки эпителия дыхательных путей. На данный момент известно о двух белках-рецепторах, встроенных в мембрану клеток-мишеней для вируса:

1. Рецептор ACE2, он же – ангиотензинпревращающий фермент 2. Этот белок выполняет множество разнообразных функций, он есть в клетках мозга, мочевого пузыря, сердца и других органов.

2. Рецептор CD147, он же – базигин. Это белок из класса иммуноглобулинов, необходимый для распознавания клеток друг другом, для сперматогенеза, иммунных реакций и т. д. Он тоже есть в разных органах и тканях.

С этими рецепторами вирус взаимодействует при помощи своих гликопротеинов, встроенных в капсид (белковую оболочку) и образующих «корону», благодаря которой эти вирусы получили свое название. После этого внутрь клетки «впрыскивается» РНК – генетический материал вируса, с помощью которого запускается процесс производ-

ства белков для вирусного капсида и репликации РНК — процесса получения ее многочисленных копий. Далее внутри клетки собираются новые вирусные частицы, при их выходе наружу клетка погибает [2; 3; 4]. Со времени появления первого штамма SARS-CoV-2 произошло несколько мутаций коронавируса, особо опасным штаммом был Delta (штамм B.1.617.2), приводящий к летальным исходам [5]. Далее штамм SARS-CoV-2 скрестился с более ранним штаммом HCoV-229E, вызывающим ОРВИ [6]. В 2023 г. у штамма Omicron (B.1.1.529) [7; 8] произошла рекомбинация РНК+ и появился новый штамм Kraken (XBB.1.5), представляющий собой сублинию рекомбинанта двух других ответвлений омикрона. Штамм Kraken быстро стал доминирующей формой SARS-CoV-2. Первый случай штамма Kraken в России был зафиксирован 27 декабря в 2022 г. Пенза [9]. К настоящему моменту Kraken особой опасности не представляет, и тем не менее в конце января 2023 г. в России было отмечено повышение заболеваемости SARS-CoV-2 до 20% [10]. Заболевание протекает как сезонная вирусная инфекция.

Материалы и методы

Теоретические подходы при исследовании были основаны на теории иммунного состояния организма человека, системного анализа, дифференциально-интегрального исчисления и теории вероятности. В качестве материалов выступали показатели 247 иммунограмм за период 2020–2021 гг. по исследованиям

влияния коронавирусной инфекции на детей и подростков Пермского края [1]. Исследования иммунной системы человека проводились на основе серологического и проточного цитофотометрического анализа. Материалом для исследования служила сыворотка крови. Биохимические исследования серологического анализа были основаны на состоянии иммуноглобулинов IgA, IgM и IgG. Иммунный статус (ES) определялся на основе определения фагоцитарных показателей: абсолютное значение фагоцитоза, фагоцитарное число и фагоцитарный индекс. В иммунограммах проточного цитофотометрического анализа были выбраны: лейкоциты, лимфоциты, NK-клетки (CD16+CD56+), Т-хелперы (CD3+CD4+) и индекс иммунорегуляции CD4+/CD8+. При анализе показателей иммунитета использовались количественные показатели референсных интервалов, используемых в лаборатории медицинского центра «Философия красоты и здоровья». Показатели иммунограмм изучались для четырех групп пациентов, проживающих в Пермском крае, в зависимости от взаимного состояния иммуноглобулинов IgA, IgM, IgG. Данные по активности коронавируса и количестве заболевших жителей брались из открытых источников. Данные о количестве жителей, проживающих в Пермском крае, были взяты из переписи населения. Строение генома SARS-CoV-2 отражено в базе данных GenBank: MN908947.3. Трекер мутаций SARS-CoV-2 изучался по хранилищу: [https://users.math.msu.edu/users/weig/SARS-CoV-2 Mutation Tracker.html](https://users.math.msu.edu/users/weig/SARS-CoV-2%20Mutation%20Tracker.html).

Результаты и их обсуждение

Разработка модели системы «Клетка – Вирус – Среда обитания» (КВС)

В настоящее время среди вирусов особую опасность представляют корона-вирусы. При разработке вакцины от SARS-CoV-2 необходимо иметь методику для исследования характеристик и оценки состояния иммунитета человека. Для формализации элементов системы КВС введем следующие множества:

– множество показателей иммунограммы

$$И = \{ И_m, И_c, ПЦФМ \},$$

где $И_m = \{ A, M, G \}$ – множество иммуноглобулинов; $И_c = \{ \phi_1, \phi_2, \phi_3 \}$ – множество элементов иммунного статуса; $ПЦФМ = \{ \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_8 \}$ – множество элементов показателей проточного цитофотометрического анализа;

– множество типов клеток человека

$$K = \{ k_1, k_2, \dots, k_l \};$$

– семейство штаммов коронавируса

$$B = \{ b_1, b_2, \dots, b_n \};$$

– множество элементов природной среды

$$C = \{ c_1, c_2, \dots, c_m \}.$$

Взаимосвязи между объектами системы определим булевыми отношениями (Б1, Б2, Б3, Б4):

$$B \text{ Б1 } K, C \text{ Б2 } K, C \text{ Б3 } B, B \text{ Б4 } И. \quad (1)$$

Разложим отношения (Б1, Б2, Б3, Б4) на два подмножества – здоровая (1) и инфицированная (2) клетка. В этом случае система (1) преобразуется следующим образом [11]:

$$\begin{aligned} &B \text{ Б1 } K1 [C1, K1], C \text{ Б1 } K2, \\ &C \text{ Б3 } B [C3, B1], C \text{ Б3 } B2, \\ &B \text{ Б4 } И1 [C4, И1], C \text{ Б4 } И2. \end{aligned} \quad (2)$$

Общее состояние системы КВС описывается системой выражений:

$$\begin{aligned} CK &= F1[\{SK\}, C1, C2], \\ CB &= F2[\{SB\}, C3], \\ CI &= F4[\{SI\}, C4]. \end{aligned} \quad (3)$$

На состояние системы С(КВС) влияет состояние СВ деструктивных белков штаммов коронавируса SARS-CoV-2, имеющих определенные биологические свойства; индивидуальные особенности клетки СК, зависящие от ее защитных функций, климатогеографических особенностей проживания человека С(ПС) и состояния иммунограммы СИ. Исследования по моделированию системы «Коронавирус – Переносчик – Человек – Окружающая среда» изучались в работе [12].

Показатель иммуноглобулинов $\Delta\Phi(И_m)$ изучался по отклонению параметров трех иммуноглобулинов – А, М и G:

$$\Delta\Phi(И_m) = \frac{\partial И_m}{\partial A} \Delta A + \frac{\partial И_m}{\partial M} \Delta M + \frac{\partial И_m}{\partial G} \Delta G. \quad (4)$$

Показатель $\Delta\Phi(ПЦФМ)$ зависит от состояния лейкоцитов ($n1$), лимфоцитов ($n2$), Т-лимфоцитов ($n3$), В-лимфоцитов ($n4$), НК-клеток ($n5$), Т-хелперов ($n6$), НКТ-клеток ($n7$) и индекса иммунорегуляции ($n8$)

$$\begin{aligned} \Delta\Phi(ПЦФМ) &= \frac{\partial ПЦФМ}{\partial n1} \Delta n1 + \frac{\partial ПЦФМ}{\partial n2} \Delta n2 + \\ &+ \frac{\partial ПЦФМ}{\partial n3} \Delta n3 + \frac{\partial ПЦФМ}{\partial n4} \Delta n4 + \frac{\partial ПЦФМ}{\partial n5} \Delta n5 \\ &+ \frac{\partial ПЦФМ}{\partial n6} \Delta n6 + \frac{\partial ПЦФМ}{\partial n7} \Delta n7 + \frac{\partial ПЦФМ}{\partial n8} \Delta n8. \end{aligned}$$

Далее были составлены дифференциальные уравнения отклонения показателей лейкоцитарной формулы крови, иммунного статуса от возраста пациентов t (возраст пациентов охватывал период до 17 лет и был сгруппирован на три интервала: 0–3 лет – младшая группа; 4–9 лет – средняя группа и 10–17 лет – старшая группа) и состояния иммуноглобулинов (IgA, IgM, IgG) по материалам исследований [1].

Зависимости показателей ПЦФМ, при котором значения иммуноглобулинов IgA, IgM, IgG находятся в референтном интервале (отсутствие заболевания), представлены в таблице 1. Эмпирические уравнения были получены с использованием интерполяции с подбором в качестве несущих функций логарифмического, экспоненциального или полиномиального выражений. В качестве первичных данных выступали исследования, опубликованные в работе [1].

Таблица 1. Зависимости лейкоцитарной формулы крови при состоянии отсутствия заболевания

Table 1. Dependences of the leukocyte formula of blood in the absence of the disease

Показатель Indicator	Зависимость Dependence	Состояние Condition
Лейкоциты n_1	$\partial n_1 / \partial t = -18,175t^2 + 77,905t + 13,19$	РИ
	$\partial n_1 / \partial t = 18,355t^2 - 80,295t + 89,02$	↑РИ
	$\partial n_1 / \partial t = 1,665t - 1,6033$	↓РИ
Лимфоциты n_2	$\partial n_2 / \partial t = 40,372 \ln(t) + 51,441$	РИ
	$\partial n_2 / \partial t = 24,815t^2 - 122,6t + 147,78$	↑РИ
	$\partial n_2 / \partial t = 1,665t + 2,7167$	↓РИ
НК–клетки (CD16+CD56+) n_5	$\partial n_5 / \partial t = -12,79 \ln(t) + 93,33$	РИ
	$\partial n_5 / \partial t = -2,768 \ln(t) + 6,0798$	↑РИ
	$\partial n_5 / \partial t = -4,625t^2 + 26,835t - 22,21$	↓РИ
Т-хелперы (CD3+CD4+) n_6	$\partial n_6 / \partial t = 69,744 \ln(t) + 16,615$	РИ
	$\partial n_6 / \partial t = 364,2e - 1,61t$	↑РИ
	$\partial n_6 / \partial t = -22,405t^2 + 91,285t - 68,88$	↓РИ
Индекс иммунорегуляции CD4+/CD8+ n_8	$\partial n_8 / \partial t = -32,295t^2 + 144,81t - 93,76$	РИ
	$\partial n_8 / \partial t = 38,215t^2 - 188,49t + 231,52$	↑РИ
	$\partial n_8 / \partial t = 36,517 \ln(t) + 0,1667$	↓РИ

Примечание. РИ – референтный интервал; ↓РИ – при понижении показателей от референтного интервала; ↑РИ – при превышении показателей от референтного интервала.

Показатель фагоцитозов $\Delta\Phi(\text{Ис})$ описывается параметрами иммунного статуса:

$$\Delta\Phi(\text{Ис}) = \frac{\partial \text{Ис}}{\partial \phi_1} \Delta\phi_1 + \frac{\partial \text{Ис}}{\partial \phi_2} \Delta\phi_2 + \frac{\partial \text{Ис}}{\partial \phi_3} \Delta\phi_3. \quad (5)$$

Зависимости иммунного статуса, при котором значения иммуноглобулинов IgA, IgM, IgG находятся в референтном интервале (отсутствие заболевания), представлены в таблице 2.

Таблица 2. Зависимости иммунного статуса при состоянии отсутствия заболевания

Table 2. Dependences of the immune status in the absence of the disease

Показатель Indicator	Зависимость Dependence	Состояние Condition
Абсолютное значение фагоцитоза ϕ_1	$\frac{\partial \phi_1}{\partial t} = -8,475t^2 + 26,815t + 19,16$	РИ
	$\frac{\partial \phi_1}{\partial t} = 44,755e - 0,498t$	↑РИ
	$\frac{\partial \phi_1}{\partial t} = 25,059e0,3162t$	↓РИ
Фагоцитарное число ϕ_2	$\frac{\partial \phi_2}{\partial t} = 84,95e - 0,44t$	РИ
	$\frac{\partial \phi_2}{\partial t} = -11,74t^2 + 44,25t - 13,76$	↑РИ
	$\frac{\partial \phi_2}{\partial t} = 15,588e0,4647t$	↓РИ
Фагоцитарный индекс ϕ_3	$\frac{\partial \phi_3}{\partial t} = -7,295t^2 + 19,805t + 39,57$	РИ
	$\frac{\partial \phi_3}{\partial t} = 8,125t^2 + 30,625t - 12,08$	↑РИ
	$\frac{\partial \phi_3}{\partial t} = 15,42t^2 - 50,43t + 72,51$	↓РИ

Примечание. РИ – референтный интервал; ↓РИ – при понижении показателей от референтного интервала; ↑РИ – при превышении показателей от референтного интервала.

Рассмотрим также показатели иммунограммы в состоянии болезни (табл. 3 и 4). Здесь также учитывалось отклонение иммуноглобулинов А и М от

референтного интервала (РИ): ↓ – значение показателей меньше РИ; ↑ – значение показателей больше РИ.

Таблица 3. Зависимости показателей лейкоцитарной формулы крови при состоянии болезни (отклонение иммуноглобулинов IgA, IgM от референтного интервала)**Table 3.** Dependences of indicators of the leukocyte formula of blood in the state of the disease (deviation of immunoglobulins IgA, IgM from the reference interval)

Показатель Indicator	Зависимость Dependence	IgA, IgM	Состояние Condition
Лейкоциты n_1	$\frac{\partial n_1}{\partial t} = 10,525t^2 - 31,575t + 21,05$	↓	РИ
	$\frac{\partial n_1}{\partial t} = -43,75t^2 + 168,75t - 112,5$		↑РИ
	$\frac{\partial n_1}{\partial t} = 0$		↓РИ
	$\frac{\partial n_1}{\partial t} = -43,75t + 133,33$	↑	РИ
	$\frac{\partial n_1}{\partial t} = 0$		↑РИ
	$\frac{\partial n_1}{\partial t} = 0$		↓РИ
Лимфоциты n_2	$\frac{\partial n_2}{\partial t} = -16,445t^2 + 74,335t - 32,89$	↓	РИ
	$\frac{\partial n_2}{\partial t} = 0$		↑РИ
	$\frac{\partial n_2}{\partial t} = 18,42t^2 - 55,26t + 36,84$		↓РИ
	$\frac{\partial n_2}{\partial t} = -37,5t + 116,67$	↑	РИ
	$\frac{\partial n_2}{\partial t} = 0$		↑РИ
	$\frac{\partial n_2}{\partial t} = 10,525t^2 - 31,575t + 21,05$		↓РИ
НК-клетки (CD16+CD56+) n_5	$\frac{\partial n_5}{\partial t} = -50t^2 + 200t - 150$	↓	РИ
	$\frac{\partial n_5}{\partial t} = 0$		↑РИ
	$\frac{\partial n_5}{\partial t} = 34,21t^2 - 102,63t + 68,42$		↓РИ
	$\frac{\partial n_5}{\partial t} = -50t^2 + 200t - 150$	↑	РИ
	$\frac{\partial n_5}{\partial t} = 0$		↑РИ
	$\frac{\partial n_5}{\partial t} = 15,79t^2 - 47,37t + 31,58$		↓РИ

Показатель Indicator	Зависимость Dependence	IgA, IgM	Состояние Condition
Т-хелперы (CD3+CD4+) n_6	$\frac{\partial n_6}{\partial t} = -27,96t^2 + 121,38t - 80,92$	↓	РИ
	$\frac{\partial n_6}{\partial t} = 0$		↑РИ
	$\frac{\partial n_6}{\partial t} = -27,96t^2 + 121,38t - 80,92$		↓РИ
	$\frac{\partial n_6}{\partial t} = -43,75t + 133,33$	↑	РИ
	$\frac{\partial n_6}{\partial t} = 18,42t^2 - 55,26t + 36,84$		↑РИ
	$\frac{\partial n_6}{\partial t} = 0$		↓РИ
Индекс иммунорегуляции CD4+/CD8+ n_8	$\frac{\partial n_8}{\partial t} = -26,645t^2 + 117,44t - 78,29$	↓	РИ
	$\frac{\partial n_8}{\partial t} = 0$		↑РИ
	$\frac{\partial n_8}{\partial t} = -26,645t^2 + 117,44t - 78,29$		↓РИ
	$\frac{\partial n_8}{\partial t} = -37,5t^2 + 137,5t - 75$	↑	РИ
	$\frac{\partial n_8}{\partial t} = 45,725t^2 - 199,68t + 216,45$		↑РИ
	$\frac{\partial n_8}{\partial t} = 0$		↓РИ

Примечание. РИ – референтный интервал; ↓РИ – при понижении показателей от референтного интервала; ↑РИ – при превышении показателей от референтного интервала.

Таблица 4. Зависимости показателей иммунного статуса при состоянии болезни (отклонение иммуноглобулинов ↑(IgA, IgM) – в большую сторону от референтного интервала, ↓(IgA, IgM) – в меньшую сторону)

Table 4. Dependences of immune status indicators in the state of the disease (deviation of immunoglobulins ↑(IgA, IgM) – in a big way from the reference interval, ↓(IgA, IgM) – downwards)

Показатель Indicator	Зависимость Dependence	IgA, IgM	Состояние Condition
Абсолютное значение фагоцитоза ϕ_1	$\frac{\partial \phi_1}{\partial t} = 41,445t^2 - 149,34t + 132,89$	↓	РИ
	$\frac{\partial \phi_1}{\partial t} = -11,405t^2 + 50,885t - 39,48$		↑РИ
	$\frac{\partial \phi_1}{\partial t} = 0$		↓РИ

Показатель Indicator	Зависимость Dependence	IgA, IgM	Состояние Condition
Абсолютное значение фагоцитоза Φ_1	$\frac{\partial \Phi_1}{\partial t} = 45,395t^2 - 211,19t + 240,79$	↑	РИ
	$\frac{\partial \Phi_1}{\partial t} = 7,895t^2 - 23,685t + 15,79$		↑РИ
	$\frac{\partial \Phi_1}{\partial t} = -83,33t^2 + 333,32t - 249,99$		↓РИ
Фагоцитарное число Φ_2	$\frac{\partial \Phi_2}{\partial t} = 22,695t^2 - 80,585t + 95,39$	↓	РИ
	$\frac{\partial \Phi_2}{\partial t} = 7,895t^2 - 23,685t + 15,79$		↑РИ
	$\frac{\partial \Phi_2}{\partial t} = 0$		↓РИ
	$\frac{\partial \Phi_2}{\partial t} = 37,83t^2 - 175,99t + 200,66$	↑	РИ
	$\frac{\partial \Phi_2}{\partial t} = 13,16t - 26,32$		↑РИ
	$\frac{\partial \Phi_2}{\partial t} = -75t^2 + 300t - 225$		↓РИ
Фагоцитарный индекс Φ_3	$\frac{\partial \Phi_3}{\partial t} = 0$	↓	РИ
	$\frac{\partial \Phi_3}{\partial t} = 0$		↑РИ
	$\frac{\partial \Phi_3}{\partial t} = 10,525t^2 - 31,575t + 21,05$		↓РИ
	$\frac{\partial \Phi_3}{\partial t} = -75t^2 + 300t - 225$	↑	РИ
	$\frac{\partial \Phi_3}{\partial t} = 0$		↑РИ
	$\frac{\partial \Phi_3}{\partial t} = 0$		↓РИ

Примечание. РИ – референтный интервал; ↓РИ – при понижении показателей от референтного интервала; ↑РИ – при превышении показателей от референтного интервала.

При оцифровке показателей иммунограммы при других состояниях иммуноглобулинов можно получить более полную картину при разных стадиях заболеваний пациентов.

В целом показатель иммунограммы $\Delta\Phi(I)$ можно оценить по аддитивной функций отклонения параметров иммунограммы:

$$\Delta\Phi(I) = \frac{\Phi(\text{ПЦФМ})^{\text{РИ}} - \Phi(\text{ПЦФМ})}{\Phi(\text{ПЦФМ})^{\text{РИ}}} + \frac{\Phi(I_{\text{М}})^{\text{РИ}} - \Phi(I_{\text{М}})}{\Phi(I_{\text{М}})^{\text{РИ}}} + \frac{\Phi(I_{\text{С}})^{\text{РИ}} - \Phi(I_{\text{С}})}{\Phi(I_{\text{С}})^{\text{РИ}}}, \quad (6)$$

где РИ – показатели референтного интервала.

Исследование модели оценки состояния системы КВС

Рассмотрим построение системы уравнений Колмогорова для исследования вероятности состояния системы КВС. Состояние системы КВС опишем функционалом, характеризующим состояние массивов элементов (4–6). Исследуем более подробно безопасность человека по состоянию клеток организма СК:

$$\text{СК} = \text{ФК} + \Delta\text{ФК}(\text{В}) + \Delta\text{ФК}(\text{ПС}) + \Delta\text{ФК}(\text{И}), \quad (7)$$

где собственные свойства клетки (ФК) определяются подверженностью разрушения (модификации) элементов рибонуклеиновых кислот, обеспечивающих хранение и передачу генетической информации от воздействия РНК+ коронавируса.

В данной работе изучено состояние системы по выходной функции, описывающей показатели инфицирования человека на примере Пермского края.

Система КВС может состоять и переходить (a_{ij}) в следующие состояния: из функционального состояния (c_1) в опасное (c_2), инфекционное (c_3) и наоборот. При повышении устойчивости иммунной системы организма клетка не допускает проникновение и размножение в

ней коронавируса. В состоянии (c_4) клетка погибает. Система дифференциальных уравнений вероятности состояний c_i и переходов a_{ij} системы КВС сформулирована с помощью системы уравнений Колмогорова:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dc_1(\tau)}{dt} &= a_{21}c_2(\tau) - a_{12}c_1(\tau), \\ \frac{dc_2(\tau)}{dt} &= a_{12}c_1(\tau) + a_{32}c_3(\tau) - a_{21}c_2(\tau) - a_{23}c_2(\tau), \\ \frac{dc_3(\tau)}{dt} &= a_{23}c_2(\tau) - a_{32}c_3(\tau) - a_{34}c_3(\tau), \\ \frac{dc_4(\tau)}{dt} &= a_{34}c_3(\tau). \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Систему коэффициентов a_{ij} , описывающих динамику влияния SARS-CoV-2 в соответствии с системой уравнений (8), опишем матрицей коэффициентов:

$$\mathfrak{R} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{23} & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 & a_{34} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Матрицу вероятностей состояния клетки опишем массивом:

$$P = [p_1, p_2, p_3, p_4]. \quad (10)$$

Вероятностная модель инфицирования клетки

Коронавирусы обладают особенностями в транскрипции РНК+. За счет механизма адсорбции коронавирусы проникают в клетку человека. Далее происходит синтез вирусной РНК-полимеразы. Составим статистическую модель инфицирования клетки относительно вероятностной функции нормального распределения Гаусса (Γ) разрушения клетки и получим следующее выражение:

$$C_K(\tau) = \int_0^t \left(\frac{1}{\sigma_c \sqrt{2\pi}} \exp \left(- \left[\frac{\Gamma_c - M(\Gamma_c)}{2\sigma_c} \right]^2 \right) \exp(-a_c t) \right) d\tau. \quad (11)$$

Далее, на примере динамики развития вирусной инфекции можно определить коэффициенты матриц (9, 10).

Влияние вирусной инфекции SARS-CoV-2 на развитие болезни человека

SARS-CoV-2 относится к вирусам легочной пневмонии. Косвенно SARS-CoV-2 воздействует и на другие важные органы, может развиваться инфаркт миокарда, почечная недостаточность, загустение крови.

На следующем этапе исследований подобраны коэффициенты матрицы

(9–10) с учетом натуральных данных развития пандемии на примере Пермского края Российской Федерации. Рассмотрена динамика развития пандемии в период с 1 до 30 декабря 2020 г. (рис. 1). Количество летальных исходов (состояние p_4) отмечено красной линией, количество тестов с положительной реакцией (состояние p_3) отмечено голубой линией, количество вылеченных людей (состояние p_1) отмечено зеленой линией. В статье [12] показаны подходы к разработке экспресс-анализатора на наличие антигенов SARS-CoV-2 с использованием твердофазного иммунохроматографического анализа, что также может повысить выявление инфицированных в Российской Федерации.

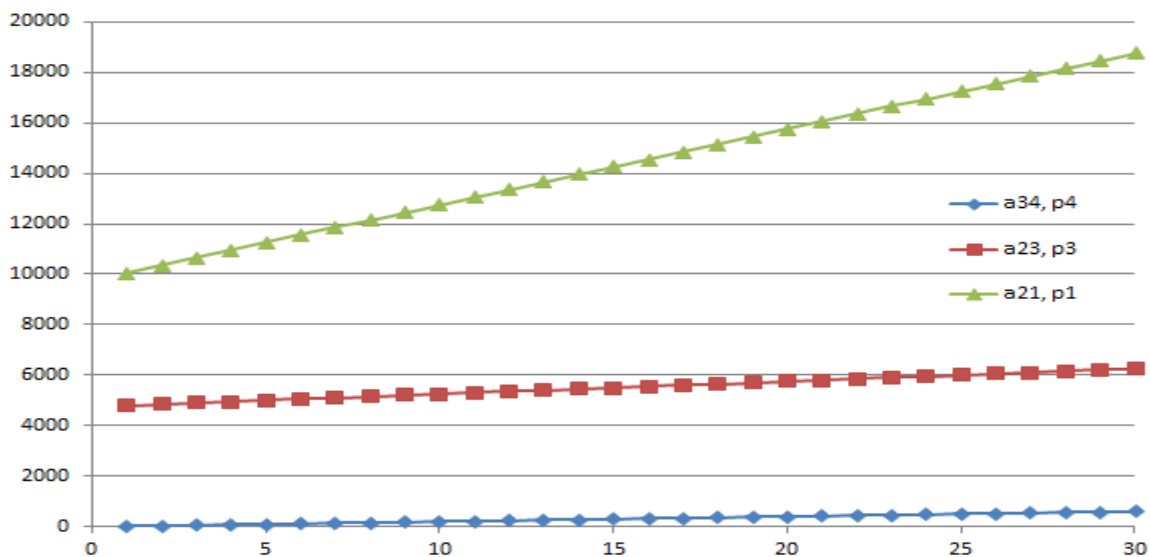


Рис. 1. Динамика развития пандемии в период с 1 до 30 декабря 2020 г. на примере Пермского края Российской Федерации: выздоровление – p_1 , a_{21} ; инфекционное состояние – p_3 , a_{23} ; летальный исход – состояние p_4 , a_{34}

Fig. 1. Dynamics of the pandemic development in the period from December 1 to December 30, 2020 by example Perm Region of the Russian Federation: recovery – p_1 , a_{21} ; infectious condition – p_3 , a_{23} ; fatal outcome – condition p_4 , a_{34}

Имитационное моделирование

В статье [14] была исследована логистическая модель развития популяции

SARS-CoV-2, основанная на решении уравнения Реймерса. Рассмотрим динамику поражения клеток, вызванного ле-

гочной пневмонией. Результаты имитационного моделирования тяжести заболевания человека при коэффициентах вероят-

ности переходов функционального состояния клетки матрицы (9) в течение 30 дней развития болезни показаны на рисунке 2.

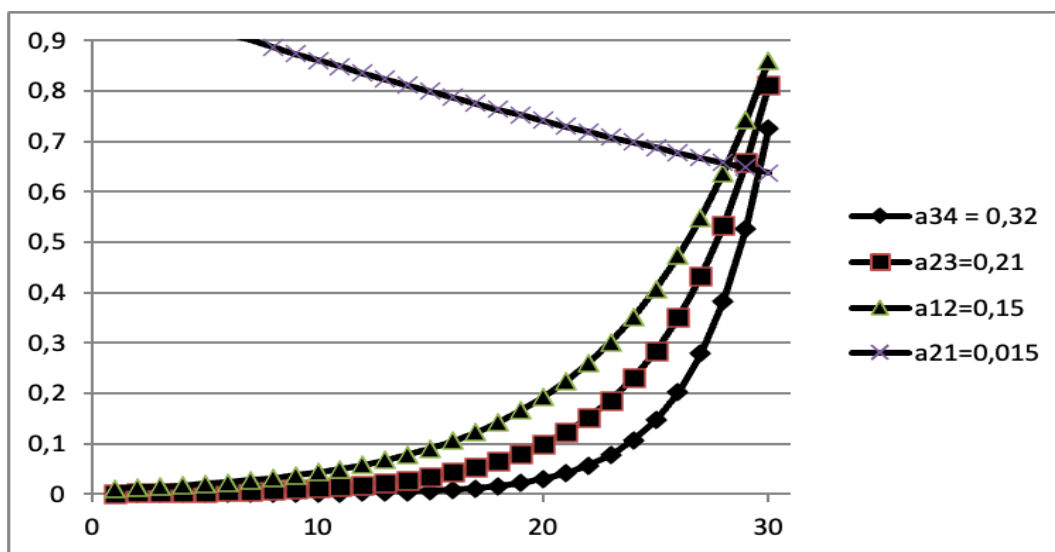


Рис. 2. Результаты имитационного моделирования заболевания человека в течение 30 дней развития болезни при разных коэффициентах вероятности переходов функционального состояния клетки

Fig. 2. Results of simulation modeling of human disease during 30 days of disease development at different coefficients of probability of transitions of the functional state of the cell

При сопоставлении статистических результатов (рис. 1) и результатов имитационного моделирования (рис. 2) исходя из тяжести заболевания получены коэффициенты матрицы:

$$\mathfrak{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0,15 & 0 & 0 \\ 0,015 & 0 & 0,21 & 0 \\ 0 & -0,05 & 0 & 0,32 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Матрица вероятностей исходов заболевания жителей Р, учитывая данные статистических исследований на примере Пермского края Российской Федерации, численность населения Пермского края по Всероссийской переписи населения 2010 г., описана вектором

$$P = [0,008; -; 0,011; 0,004]. \quad (13)$$

В настоящее время для защиты человека от поражения штаммами вируса SARS-CoV-2 используется вакцинация

[15; 16]. В 2020–2021 гг. в Российской Федерации разработаны вакцины «Спутник V», «Спутник-Lite» Центром им. Гамалеи, которые показали высокую эффективность [17; 18].

Исследование разработанных моделей позволит своевременно и надежно отслеживать эпидемиологическое состояние системы КВС от влияния коронавирусов [19; 20].

Оцифровка показателей изменения иммунограмм показала, что в виде несущего сигнала могут выступать различные законы: логарифмические, экспоненциальные, полиномиальные, линейные и др. При отсутствии заболевания изменения показателей иммунограмм от возраста удалось оцифровать в основном логарифмическими и экспоненциальными законами, а при заболевании

уравнения носят полиномиальный и линейный характер.

Результаты исследований показали, что при отсутствии отклонений иммуноглобулинов от референтного интервала наибольшие понижения уровня от референтного интервала отмечались в группе показателей иммунного статуса фагоцитоза с увеличением отклонения в сторону старших возрастных групп (10–17 лет). Наибольшие превышения от референтного интервала наблюдались у младших возрастных групп (до 3 лет) по Т-хелперам и индексу иммунорегуляции, что свидетельствует о гиперактивности иммунитета. У пациентов, находящихся в активной стадии болезни, наблюдались также наибольшие понижения уровня от референтного интервала у показателя: фагоцитарная группа для детей средней (4–9 лет) и младшей возрастных групп при повышенном уровне иммуноглобулинов. Наибольшее превышение референтного интервала

наблюдалось по лейкоцитам у старшей возрастной группы при пониженном уровне иммуноглобулинов, а также по индексу иммунорегуляции у младшей возрастной группы при повышенном уровне иммуноглобулинов.

Выводы

Дальнейшее исследование разработанных моделей поможет оценить последствия коронавирусной инфекции. Проведенное имитационное моделирование показало адекватность математической модели. Рассчитана вероятность заболевания жителей Пермского края Российской Федерации в осенне-зимний период 2020 г. Разработана методика оценки отклонения системы КВС от нормативных показателей. Использование разработанных моделей на практике позволит снизить опасность заболевания человека с учетом вакцинации и других организационных и технических средств защиты.

Список литературы

1. Impact of the New Coronavirus Infection on the Immune System of Children and Adolescents in the Region of the Russian Federation / S. Kostarev, O. Komyagina, R. Fayzrahmanov, D. Kurushin, N. Tatarnikova, O. Novikova, T. Sereda // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19(20). P. 13669. <https://doi.org/10.3390/ijerph192013669>.
2. Bai C., Zhong Q., Gao G. F. Overview of SARS-CoV-2 genome-encoded proteins // Sci China Life Sci. 2022. Vol. 65. P. 280–294. <https://doi.org/10.1007/s11427-021-1964-4>.
3. Sohpal V. K. Computational analysis of SARS-COV-2, SARS-COV, and MERS-COV genome using MEGA // Genomics and Informatics. 2020. Vol. 18, N 3. P. 1–7.
4. Yu Chen, Qianyun Li, Deyin Gu. Emerging coronaviruses: genome structure, replication, and pathogenesis // Journal of Medical Virology. 2020. N 92(4). P. 418–423.

5. Markov P. V., Katzourakis A., Stilianakis N. I. Antigenic evolution will lead to new SARS-CoV-2 variants with unpredictable severity // *Nat Rev Microbiol.* 2022. Vol. 20(5). P. 251–252. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00722-z>.
6. Jiahui Chen, Rui Wang, Guo-Wei. Review of the mechanisms of SARS-CoV-2 evolution and transmission. URL: <https://arxiv.org/abs/2109.08148> (дата обращения: 17.03.2023).
7. Вечорко В. И., Аверков О. В., Зимин А. А. Новый штамм SARS-COV-2 омикрон – клиника, лечение, профилактика (обзор литературы) // *Кардиоваскулярная терапия и профилактика.* 2022. Т. 21, № 6. С. 89–98.
8. Вариант «ОМИКРОН?» вируса SARS-COV-2 как доминантный агент нового подъёма заболевания в условиях пандемии COVID-19 / Г. Г. Онищенко, Т. Е. Сизикова, В. Н. Лебедев, С. В. Борисевич // *Вестник Российской академии наук.* 2022. Т. 92, № 7. С. 636–646.
9. В Пензу выпустили «Кракена». URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5761223> (дата обращения: 10.03.2023).
10. В России за сутки COVID-19 заболели более 7,1 тыс. человек. URL: <https://www.interfax.ru/russia/883511> (дата обращения: 10.03.2023).
11. Курош А. Г. Курс высшей алгебры. СПб.: Лань, 2006. 432 с.
12. Project design of a device for express analysis for Coronaviridae antigens based on Omron industrial programmable logic controller / S. N. Kostarev, O. V. Kochetova, N. A. Tarnikova, T. G. Sereda // *International Journal of Biology and Biomedical Engineering.* 2020. Vol. 14. P. 21–32.
13. Костарев С. Н., Мусанипов А. А. Разработка проекта прибора определения антител коронавирусной инфекции SARS-COV-2 для военнослужащих Росгвардии // *Применение современных информационных технологий в служебно-боевой деятельности: сборник статей межвузовской научно-практической конференции / Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации.* Пермь, 2022. С. 95–98.
14. Building a tool model for the study of the ecosystem coronavirus – Vector – human – Environment / T. G. Sereda, S. N. Kostarev, Y. A. Kochinov, T. V. Kochinova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* Volgograd; Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. Vol. 548. P. 042030.
15. Ващенко В. И., Вильянинов В. Н., Шабанов П. Д. Стратегии поиска фармакологических средств против SARS-COV-2 на основе изучения структурно-генетических особенностей коронавирусов SARS-COV, MERS-COV и SARS-COV-2 // *Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии.* 2020. Т. 18, № 4. С. 269–296.
16. Elshabrawy H. A. SARS-COV-2: an update on potential antivirals in light of SARS-COV antiviral drug discoveries // *Vaccines.* 2020. Vol. 8, N 2. P. 1–33.
17. Оценка иммуногенности и реактогенности вакцины «СПУТНИК V» при ее применении у военнослужащих / С. Д. Жоголев [и др.] // *Вестник Российской Военно-медицинской академии.* 2021. Т. 23, № 4. С. 147–152.

18. Определение антител класса G к SARS-COV-2 после применения вакцины «Гам-КОВИД-Вак» или «Спутник V» НИЦЭМ имени Н. Гамалеи / Н. А. Алхутова [и др.] // Медицинский алфавит. 2021. № 13. С. 36–41.

19. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021667302. Программа для автоматизации анализа серологических маркеров антител иммуноглобулинов IGG И IGM COVID-19 (Экспресс-анализ антител IGG И IGM COVID-19) / С. Н. Костарев, О. В. Кочетова, Т. Г. Середа. № 2021666591; заявл. 20.10.2021; опубл. 27.10.2021.

20. Разработка системы автоматического диагноза на наличие антител иммуноглобулинов IGG и IGM SARS-COV-2 / С. Н. Костарев, О. В. Кочетова, Н. А. Татарникова, Т. Г. Середа // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 2. С. 8–24.

References

1. Kostarev S., Komyagina O., Fayzrakhmanov R., Kurushin D., Tatarnikova N., Novikova O., Sereda T. Impact of the New Coronavirus Infection on the Immune System of Children and Adolescents in the Region of the Russian Federation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, vol. 19(20), p. 13669. <https://doi.org/10.3390/ijerph192013669>

2. Bai C., Zhong Q., Gao G. F. Overview of SARS-CoV-2 genome-encoded proteins. *Sci China Life Sci.*, 2022, vol. 65, pp. 280–294. <https://doi.org/10.1007/s11427-021-1964-4>

3. Sohpal V. K. Computational analysis of SARS-COV-2, SARS-COV and MERS-COV genome using MEGA. *Genomics and Informatics*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 1–7.

4. Yu Chen, Qianyun Li, Deyin Gu. Emerging coronaviruses: genome structure, replication, and pathogenesis. *Journal of Medical Virology*, 2020, no. 92(4), pp. 418–423.

5. Markov P. V., Katzourakis A., Stilianakis N. I. Antigenic evolution will lead to new SARS-CoV-2 variants with unpredictable severity. *Nat Rev Microbiol*, 2022, vol. 20(5), pp. 251–252. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00722-z>

6. Jiahui Chen, Rui Wang, Guo-Wei. Review of the mechanisms of SARS-CoV-2 evolution and transmission. Available at: <https://arxiv.org/abs/2109.08148>. (accessed 17.03.2023)

7. Vechorko V. I., Averkov O. V., Zimin A. A. Novyj shtamm SARS-COV-2 omikron – klinika, lechenie, profilaktika (obzor literatury) [New SARS-COV-2 strain omicron – clinic, treatment, prevention (literature review)]. *Kardiovaskuljarnaja terapija i profilaktika = Cardiovascular Therapy and Prevention*, 2022, vol. 21, no. 6, pp. 89–98.

8. Onishhenko G. G., Sizikova T. E., Lebedev V. N., Borisevich S. V. Variant "OMIKRON?" virusa SARS-COV-2 kak dominantnyj agent novogo pod#joma zabojevanija v uslovijah pandemii COVID-19 [Option "OMICRON?" of the SARS-COV-2 virus as a dominant agent of a new rise in the disease in the context of the COVID-19 pandemic]. *Vestnik*

Rossijskoj akademii nauk = Herald of the Russian Academy of Sciences, 2022, vol. 92, no. 7, pp. 636–646.

9. V Penzu vypustili "Krakena" [The Kraken was released to Penza]. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/5761223>. (accessed 10.03.2023)

10. V Rossii za sutki COVID-19 zaboleti bolee 7100 chelovek [In Russia, more than 7.1 thousand people fell ill with COVID-19 per day]. Available at: <https://www.interfax.ru/russia/883511>. (accessed 10.03.2023)

11. Kurosh A. G. Kurs vysshei algebrы [The course of higher algebra]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2006. 432 p.

12. Kostarev S. N., Kochetova O. V., Tatarnikova N. A., Sereda T. G. Project design of a device for express analysis for Coronaviridae antigens based on Omron industrial programmable logic controller. *International Journal of Biology and Biomedical Engineering*, 2020, vol. 14, pp. 21–32.

13. Kostarev S. N., Musanipov A. A. [Development of a project of a device for determining antibodies of coronavirus infection SARS-COV-2 for military personnel of the Russian Guard]. *Primenenie sovremennykh informatsionnykh tekhnologii v sluzhebno-boevoi deyatelnosti. Sbornik statei mezhevuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Application of modern information technologies in service and combat activity. Collection of articles of the interuniversity scientific and practical conference]. Perm, Perm Military Institute of the National Guard of the Russian Federation Publ., 2022, pp. 95–98.

14. Sereda T. G., Kostarev S. N., Kochinov Y. A., Kochinova T. V. Building a tool model for the study of the ecosystem "coronavirus – Vector – human – Environment". IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Volgograd, Krasnoyarsk, Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020, vol. 548, p. 042030.

15. Vashhenko V. I., Vil'janinov V. N., Shabanov P. D. Strategii poiska farmakologicheskikh sredstv protiv SARS-COV-2 na osnove izuchenija strukturno-geneticheskikh osobennostej koronavirusov SARS-COV, MERS-COV i SARS-COV-2 [Strategies for the search for pharmacological agents against SARS-COV-2 based on the study of the structural and genetic features of SARS-COV, MERS-COV and SARS-COV-2 coronaviruses]. *Obzory po klinicheskoy farmakologii i lekarstvennoy terapii = Reviews of Clinical Pharmacology and Drug Therapy*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 269–296.

16. Elshabrawy H. A. SARS-COV-2: an update on potential antivirals in light of SARS-COV antiviral drug discoveries. *Vaccines*, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 1–33.

17. Zhogolev S. D., eds. Ocenka immunogennosti i reaktogenosti vakciny "Sputnik V" pri ee primenении u voennosluzhashchih [Evaluation of the immunogenicity and reactivity of the Sputnik V vaccine when used in military personnel]. *Vestnik Rossijskoj Voenno-meditsinskoj akademii = Bulletin of the Russian Military Medical Academy*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 147–152.

18. Alhutova N. A., eds. Opredelenie antitel klassa G k SARS-COV-2 posle primeneniya vaktsiny "Gam-KOVID-Vak" ili "Sputnik V" NITsEM imeni N. Gamalei [Determination of

class G antibodies to SARS-COV-2 after the use of the vaccine "Gam-COVID-Vac" or "Sputnik V" by N. Gamalei]. *Meditsinskii alfavit = Medical Alphabet*, 2021, no. 13, pp. 36–41.

19. Kostarev S. N., Kochetova O. V., Sereda T. G. Programma dlya avtomatizatsii analiza serologicheskikh markerov antitel immunoglobulinov IGG I IGM COVID-19 (Ekspress-analiz antitel IGG I IGM COVID-19) [Program for automation of IGG and IGM COVID-19 serological antibody marker analysis]. Certificate of registration of the computer program RF, no. 2021667302, 2021.

20. Kostarev S. N., Kochetova O. V., Tatarnikova N. A., Sereda T. G. Razrabotka sistemy avtomaticheskogo diagnoza na nalichie antitel immunoglobulinov IGG i IGM SARS-COV-2 [Development of an automatic antibody diagnosis system for IGG and IGM immunoglobulins SARS-COV-2]. *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. 8–24.

Информация об авторах / Information about the Authors

Костарев Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова; профессор кафедры информационных технологий и автоматизированных систем, Пермский национальный исследовательский политехнический университет; профессор кафедры зоотехнии, Пермский институт ФСИН России, г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: iums@dom.raid.ru, ORCID: 0000-0002-3097-7037

Sergey N. Kostarev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Life Safety, Perm State Agro-Technological University named after Academician D. N. Pryanishnikov; Professor of the Department of Information Technology and Automated Systems, Perm National Research Polytechnic University; Professor of the Department of Animal Science, Perm Institute of the FPS of Russia, Perm, Russian Federation, e-mail: iums@dom.raid.ru, ORCID: 0000-0002-3097-7037

Файзрахманов Рустам Абубакирович, доктор экономических наук, заведующий кафедрой информационных технологий и автоматизированных систем, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: fayzrakhmanov@gmail.com

Rustam A. Fayzrakhmanov, Dr. of Sci. (Economics), Head of the Department of Information Technology and Automated Systems, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, e-mail: fayzrakhmanov@gmail.com

Татарникова Наталья Александровна, доктор ветеринарных наук, заведующий кафедрой инфекционных болезней, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова, Российская Федерация, e-mail: tatarnikova.n.a@yandex.ru

Новикова Оксана Валерьевна, доктор ветеринарных наук, профессор кафедры внутренних незаразных болезней, хирургии и акушерства, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова, г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: kochetovaox@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6997-9067

Серёда Татьяна Геннадьевна, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова, г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: iums.@dom.raid.ru

Natalya A. Tatarnikova, Dr. of Sci. (Veterinary), Head of the Department of Infectious Diseases, Perm State Agro-Technological University named after Academician D. N. Pryanishnikov, Perm, Russian Federation, e-mail: tatarnikova.n.a@yandex.ru

Oksana V. Novikova, Dr. of Sci. (Veterinary), Professor of the Department of Internal Non-Infectious Diseases, Surgery and Obstetrics, Perm State Agro-Technological University named after Academician D. N. Pryanishnikov, Perm, Russian Federation, e-mail: kochetovaox@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6997-9067

Tatayna G. Sereda, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Life Safety, Perm State Agro-Technological University named after Academician D. N. Pryanishnikov, Perm, Russian Federation, e-mail: iums.@dom.raid.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-95-111>

Информационная поддержка принятия решения по оценке противопожарных расстояний от границ открытых площадок для хранения АТС

А. А. Волошенко¹, М. В. Шевцов¹ ✉, А. Н. Денисов¹

¹ Академия Государственной противопожарной службы МЧС России
ул. Бориса Галушкина, д. 4, г. Москва 129366, Российская Федерация

✉ e-mail: shevtsovmv@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Разработана информационная поддержка принятия решения по оценке противопожарных расстояний от границ открытых площадок для хранения АТС до различных объектов защиты с учетом воздействия теплового потока. Объект исследования – оценка противопожарного расстояния от границ открытых площадок автотранспортных средств. Предметом исследования является информационная поддержка для принятия управленческого решения о соответствии объекта защиты требованиям пожарной безопасности, направленная на ограничение последствий распространения пожара в виде противопожарного расстояния от границ открытых площадок для хранения АТС до зданий (сооружений) I-V степеней огнестойкости классов функциональной пожарной опасности Ф.1-Ф.5. Целью данной работы выступает создание и применение индивидуальных расчетных формул для определения предельно допустимых расстояний от границ открытых площадок автотранспортных средств до различных зданий (сооружений) на основе использования программного продукта для ЭВМ.

Методы. Для решения поставленных задач использовались методы системного анализа, теории управления и принятия решений, численного эксперимента.

Результаты. В статье предлагается оценка риска причинения вреда чужому имуществу и определение значения безопасного расстояния от границ открытых площадок для хранения АТС до различных объектов защиты путем применения программного продукта «Оценка безопасного расстояния от границ открытых площадок автотранспортных средств», направленная на усовершенствование научно-экспериментальной и учебно-материальной базы научно-исследовательских, экспертных и образовательных организаций.

Предлагаемая расчетно обоснованная оценка соответствия объекта защиты требованиям пожарной безопасности по предотвращению распространения пожара направлена для практического применения при организации деятельности и осуществлении полномочий сотрудниками ФПС МЧС России, экспертами, а также собственниками объектов защиты.

Заключение. Предлагаемая информационная поддержка принятия решения по оценке противопожарных расстояний от границ открытых площадок для хранения АТС позволит установить риск причинения вреда чужому имуществу.

Ключевые слова: принятие решения; оценка; риск; автотранспортное средство; противопожарное расстояние.

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

Для цитирования: Волошенко А. А., Шевцов М. В., Денисов А. Н. Информационная поддержка принятия решения по оценке противопожарных расстояний от границ открытых площадок для хранения АТС // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 95–111. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-95-111>.

Поступила в редакцию 24.04.2023

Подписана в печать 14.05.2023

Опубликована 30.06.2023

Information Support for Decision-Making According to the Assessment of Fire-Fighting Distances from the Borders of Open Areas for PBX Storage

Alexey A. Voloshenko¹, Maxim V. Shevtsov¹ ✉, Alexey N. Denisov¹

¹ Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia
4 Boris Galushkin Str., Moscow 129366, Russian Federation

✉ e-mail: shevtsovmv@mail.ru

Abstract

The purpose of research. Information support has been developed for decision-making on the assessment of fire-fighting distances from the boundaries of open storage areas for PBX to various objects of protection, taking into account the effects of heat flow. The object of the study is an assessment of the fire-fighting distance from the boundaries of open areas of motor vehicles. The subject of the study is information support for making a management decision on the compliance of the object of protection with fire safety requirements, aimed at limiting the consequences of the spread of fire in the form of a fire-fighting distance from the boundaries of open storage areas for PBX to buildings (structures) of I-V degrees of fire resistance of functional fire hazard classes F.1-F.5. The purpose of this work is to create and application of individual calculation formulas to determine the maximum permissible distances from the boundaries of open areas of vehicles to various buildings (structures) based on the use of a computer software product.

Methods. Methods of system analysis, management theory and decision-making, and numerical experiment were used to solve the tasks.

Results. The article proposes an assessment of the risk of harm to someone else's property and the determination of the value of the safe distance from the boundaries of open areas for storing PBX to various objects of protection by using the software product «Assessment of the safe distance from the boundaries of open areas of motor vehicles», aimed at improving the scientific and experimental and educational and material base of research, expert and educational organizations.

The proposed calculation-based assessment of the compliance of the object of protection with fire safety requirements to prevent the spread of fire is aimed for practical application in the organization of activities and the exercise of powers by employees of the FPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, experts, as well as owners of protection objects.

Conclusion. The proposed information support for decision-making on the assessment of fire-fighting distances from the boundaries of open storage areas for PBX will allow you to establish the risk of harm to someone else's property.

Keywords: decision-making; assessment; risk; vehicle; fire-fighting distance.

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

For citation: Voloshenko A. A., Shevtsov M. V., Denisov A. N. Information Support for Decision-Making According to the Assessment of Fire-Fighting Distances from the Borders of Open Areas for PBX Storage. *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(2): 95–111. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-95-111>.

Received 24.04.2023

Accepted 14.05.2023

Published 30.06.2023

Введение

В современном мире некоторые задачи мониторинга пожароопасной обстановки и оценки пожарной опасности могут решаться методами искусственного интеллекта, а также с использованием переносных планшетов или смартфонов с установленными на них специальными программными продуктами [1, с. 11]. Единство методического, информационного, математического и других видов обеспечения для оперативного управления дает возможность лицу, принимающему решение, минимизировать временные, интеллектуальные и трудовые затраты при рассмотрении вопросов, требующих оперативности и концентрации [2, с. 153]. В данной статье авторами поднята проблема оценки пожарной опасности и риска причинения имущественного вреда при возгорании автотранспортных средств.

Требования пожарной безопасности предусматривают право выбора вида противопожарных преград и комплекс инженерно-технических, организационных решений, направленных на безопасность имущества от воздействия опасных факторов пожара. Типовой способ, ограничивающий распространение по-

жара между объектами защиты в действующем законодательстве, является противопожарной преградой в виде противопожарного расстояния, в том числе и от стоянок АТС [3, с. 50; 4, с. 256; 5, с. 248].

При проведении квалификации правонарушения (преступления) и принятия решения о соответствии объекта защиты требованиям пожарной безопасности, направленным на предотвращение распространения пожара между объектами защиты, принимается нормативный алгоритм оценки риска причинения вреда чуждому имуществу, который предусматривает техническое решение в виде противопожарного расстояния, закрепленное в СП 113.13330.2016 «Стоянки автомобилей. Актуализированная редакция СНиП 21-02-99*» и СП 4.13130.2013 «Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям».

Значения противопожарных расстояний от стоянки автотранспортных средств до различных зданий, сооружений СП 113.13330.2016 «Стоянки автомобилей» указаны в таблице 1.

Таблица 1. Нормативные значения противопожарного расстояния (разрыва) от сооружений для хранения легкового автотранспорта до объектов застройки**Table 1.** Normative values of the fire-fighting distance (gap) from structures for the storage of passenger vehicles to construction sites

Объекты, до которых исчисляется разрыв Objects to which the gap is calculated	Расстояние, м Distance, meter				
	Открытые автостоянки и паркинги вместимостью, машино-мест Open parking lots and parking lots with a capacity of, parking spaces				
	10 и менее 10 or less	11–50	51–100	101–300	свыше 300 over 300
Фасады жилых домов и торцы с окнами	10	15	25	35	50
Торцы жилых домов без окон	10	10	15	25	35
Территории школ, детских учреждений, ПТУ, техникумов, площадок для отдыха, игр и спорта, детских	25	50	50	50	50
Территории лечебных учреждений стационарного типа, открытые спортивные сооружения общего пользования, места отдыха населения (сады, скверы, парки)	25	50	По расчетам	По расчетам	По расчетам

Анализ требований пожарной безопасности к противопожарным расстояниям от стоянки АТС до различных зданий, сооружений показал, что выбор значения противопожарного расстояния напрямую зависит от:

- а) количества машино-мест;
- б) функционального назначения зданий, сооружений;
- в) значений степени огнестойкости и класса пожарной опасности зданий, сооружений;
- г) расчетных методик (для объектов, находящихся на территории лечебных учреждений стационарного типа, открытых спортивных сооружений общего пользования, мест отдыха населения).

Анализ пожаров на автотранспортных средствах показал важность исследования признаков пожарной опасности в виде воспламенения облучаемого материала в строительных конструкциях зданий, сооружений от воздействия излучаемого теплового потока из горящих конструкций, в том числе и от АТС [6, с. 131; 7, с. 108]. При этом хочется отметить, что различное расположение излучающей поверхности АТС относительно пожароопасных облучаемых поверхностей качественно влияет на переход пожара между ними [3, с. 52; 8, с. 30].

Таким образом, при принятии решения по определению безопасного противопожарного расстояния от границ открытых площадок для хранения АТС до

различных объектов защиты необходимо учитывать расчетную оценку воздействия излучающего теплового потока при горении АТС, а не функциональное назначение, значение степени огнестойкости, класса пожарной опасности зданий и сооружений.

Одна из таких оценок воздействия излучающего теплового потока, представленная в ГОСТ 12.1.004-91 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования» и в учебниках [9, с. 362; 10, с. 324], прошла апробацию для практического применения при установлении противопожарного расстояния расчетным путем.

Однако возможности применения расчетной оценки риска причинения вреда рядом расположенному имуществу от теплового воздействия при пожаре, связанного с угрозой влияния теплового потока через линейные значения излучающей поверхности на различные облучаемые материалы, и определения безопасного противопожарного расстояния весьма затруднительны [11, с. 42; 12, с. 8; 13, с. 29; 14, с. 225; 15, с. 257], поскольку требуют большого времени для реализации расчетных сценариев ввиду поиска большого количества численных показателей. Следовательно, для дальнейшего оформления и проведения расчетов по установлению безопасных значений противопожарных расстояний и управления пожарными рисками с учетом оценки теплового воздействия необходимо учитывать:

- вид излучающей поверхности (мотоцикл, легковой автомобиль, автобус, грузовик);
- марку АТС;
- тип поверхности излучения (кузов, проем);

– расположение АТС (переднее, заднее, боковое);

– вид облучаемой поверхности.

Таким образом, научная проблема по установлению значения противопожарного расстояния от открытых площадок для хранения АТС до различных зданий, сооружений на основе применения расчетной методики распространения опасного фактора пожара в виде излучающего теплового потока, а также ее автоматизация для повышения оперативности и практической реализации в условиях сложного сбора всех исходных показателей являются весьма актуальными.

Авторами в статье предлагается разработка информационной поддержки принятия решения при оценке требований пожарной безопасности от стоянки АТС, направленной на предотвращение риска причинения вреда чужому имуществу с учетом воздействия теплового потока при пожаре на АТС и установления значения безопасного противопожарного расстояния на основе программного продукта.

Материалы и методы

В целях применения расчётных формул по установлению безопасного противопожарного расстояния от границ открытых площадок АТС до различных зданий, сооружений I-V степеней огнестойкости, классов функциональной пожарной опасности Ф.1-Ф.5 были разработаны компьютерная программа для ЭВМ «Оценка безопасного расстояния от границ открытых площадок автотранспортных средств» на языке программирования Delphi 7 и алгоритм для ее практической реализации (рис. 1).

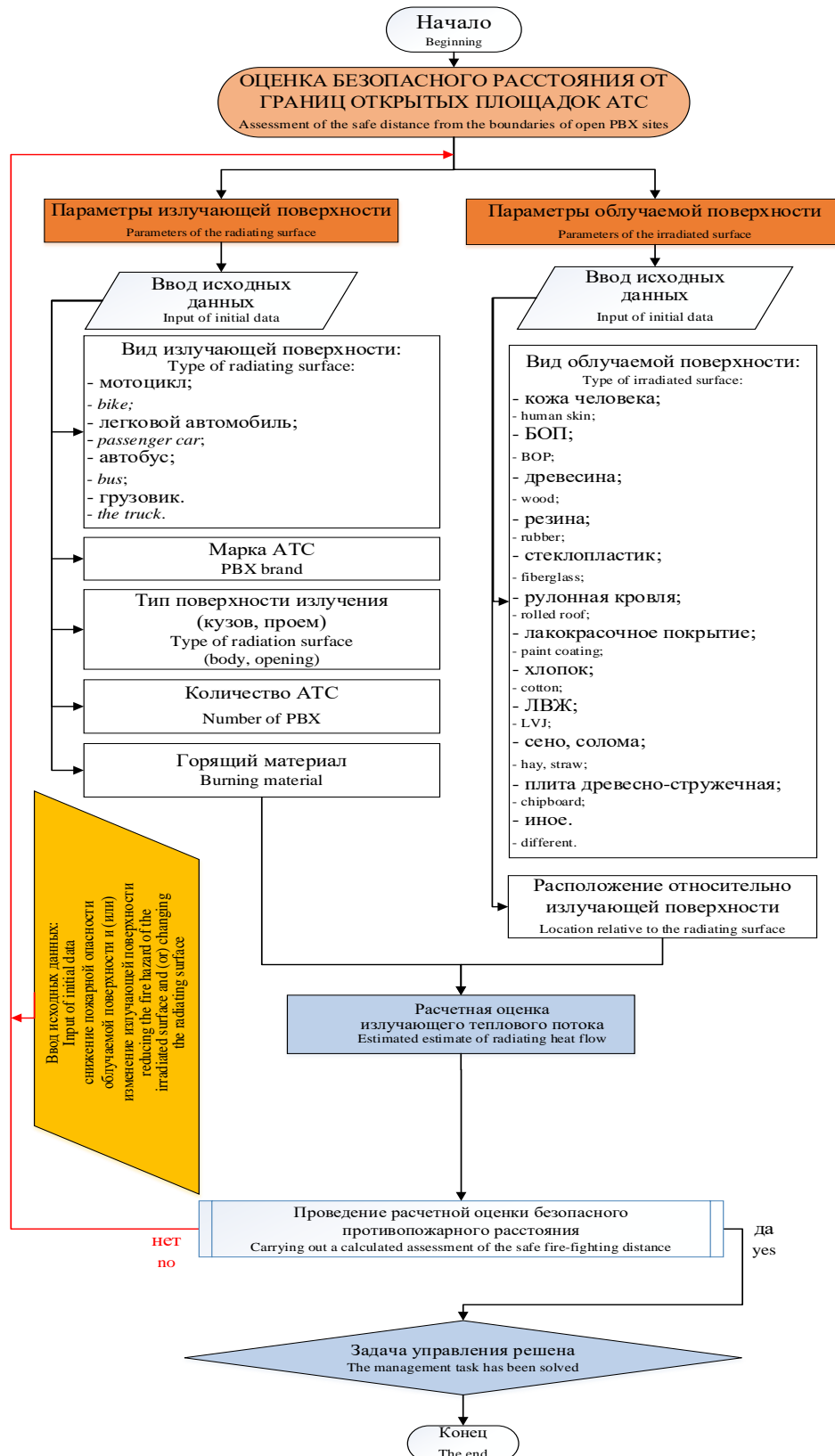


Рис. 1. Алгоритм применения компьютерной программы для ЭВМ «Оценка безопасного расстояния от границ открытых площадок автотранспортных средств»

Fig. 1. Algorithm of application of the computer program for the computer "Assessment of the safe distance from the boundaries of open areas of motor vehicles"

Практическое использование программы начинается с запуска файла «Программа». После его запуска открывается стартовое окно программы (рис. 2).

При выборе вида излучающей поверхности («Легковой автомобиль»,

«Автобус» и «Грузовик») отображается информация о вводе исходных данных (показатели) для определения расчетного значения излучающего теплового потока и отображения вывода (рис. 3).



Рис. 2. Общий вид основного окна программы «Оценка безопасного расстояния от границ открытых площадок автотранспортных средств»

Fig. 2. General view of the main window of the program "Assessment of the safe distance from the boundaries of open areas of vehicles"

Исходные данные для определения расчетной плотности теплового потока

Параметры излучающей поверхности

Вид излучающей поверхности: Легковой автомобиль

Марка: Ford Focus

Вид поверхности: Кузов

Расположение: Переднее/Заднее

Ширина кузова: 1823 мм

Высота кузова: 1484 мм

Количество АТС: 1

Горящий материал: ЛВЖ(ГЖ)

Температура пламени: 1073

Степень черноты: 0,85

Параметры облучаемой поверхности

Облучаемый материал: Стеклопластик

Критический тепловой поток: 15,3 кВт/м²

Степень черноты: 0,9

Допустимая температура: 673 К

Расположение относительно изл. поверхности

☐ по центру

☒ перпендикулярно

☐ вне центра зоны

Расстояние до излучающей поверхности: 3 м

Результат: Q_р: 4,308 кВт/м² < Q_{кр}: 15,3 кВт/м² - расстояние является БЕЗОПАСНЫМ

Кнопки: Рассчитать, Выход

Рис. 3. Исходные данные для определения расчетной плотности теплового потока через излучающие поверхности «Легковой автомобиль», «Автобус» и «Грузовик»

Fig. 3. Initial data for determining the calculated heat flux density through radiating surfaces "Passenger car", "Bus" and "Truck"

При выборе вида излучающей поверхности («Мотоцикл») отображается информация о вводе исходных для опре-

деления расчетного значения излучающего теплового потока и отображения вывода (рис. 4).

Исходные данные для определения расчетной плотности теплового потока

Параметры излучающей поверхности

Вид излучающей поверхности: Мотоцикл
 Марка: Irbis Z50R
 Длина мотоцикла: 1810 мм
 Высота мотоцикла: 1050 мм
 Количество АТС: 1
 Горючий материал: ЛВЖ(ГЖ)
 Температура пламени: 1073
 Степень черноты: 0,85

Параметры облучаемой поверхности

Облучаемый материал: Стеклопластик
 Критический тепловой поток: 15,3 кВт/м²
 Степень черноты: 0,9
 Допустимая температура: 673 К
 Расположение относительно изл. поверхности:
☒ по центру
☐ перпендикулярно
☐ вне центра зоны
 Расстояние до излучающей поверхности: 3 м

Qр: 3,086 кВт/м² < Qкр: 15,3 кВт/м² - расстояние является БЕЗОПАСНЫМ

Рассчитать Выход

Рис. 4. Исходные данные для определения расчетной плотности теплового потока через излучающую поверхность «Мотоцикл»

Fig. 4. Initial data for determining the calculated heat flux density through the radiating surface "Motorcycle"

В данных вкладках необходимо ввести параметры излучающей и облучаемой поверхности. Для этого необходимо заполнить исходные данные (показатели) для получения расчетного значения излучающего теплового потока на выбранном расстоянии.

В качестве базовых показателей при определении расчетного значения излучающего теплового потока были приняты: температура пламени горящего материала, степень черноты факела пламени и облучаемой поверхности, критическое значение теплового потока на облучаемой поверхности и ее допустимая температура.

В случае, если требуется вставка других показателей и (или) иные горя-

щие и облучаемые материалы, предусмотрен показатель «Иное», в котором реализована возможность замены названия, параметров и показателей излучающей и облучаемой поверхности.

После того как введены все показатели исходных данных (поля ввода нельзя оставлять пустыми, так как выдается «Ошибка»), необходимо нажать на кнопку «Рассчитать». После нажатия на кнопку «Рассчитать» в нижней левой части окна отобразится текст, в котором содержится информация о расчетном значении излучающего теплового потока и вывод, является ли выбранное расстояние безопасным или небезопасным.

Результаты и их обсуждение

Для оценки воспламенения поверхности облучаемого материала от воздействия излучающего теплового потока и дальнейшего установления безопасного расстояния можно воспользоваться 4 видами излучающей поверхности:

- 1) «Легковой автомобиль»;
- 2) «Автобус»;
- 3) «Мотоцикл»;
- 4) «Грузовик».

Пример (излучающая поверхность «Легковой автомобиль»)

После нажатия на вкладку «Легковой автомобиль» открывается содержание данной вкладки. В данной вкладке необходимо ввести показатели излучающей и облучаемой поверхности. Пример ввода исходных данных ((вид излучающей поверхности, марка АТС, тип поверхности излучения (кузов, проем) с ее

значениями (ширина или длина, высота), расположение (переднее, заднее, боковое), количество АТС, горящий материал с его значениями (температура пламени, степень черноты); облучаемый материал с учетом его показателей (критический тепловой поток, степень черноты, допустимая температура), расположение облучаемого материала относительно излучающей поверхности (по центру, перпендикулярно, вне центра зоны)) для проведения расчетной плотности теплового потока на установленном расстоянии и последующего подбора безопасного расстояния между излучающей и облучаемой поверхностями (фасад жилого дома – стеклопластик, нормативное противопожарное расстояние по таблице 1 должно составлять 10,0 м, с учетом расположения 1 легкового автомобиля) представлен ниже (рис. 5).

Исходные данные для определения
расчетной плотности теплового потока

Параметры излучающей поверхности

Вид излучающей поверхности: Легковой автомобил

Марка: Ford Focus

Вид поверхности: Кузов

Ширина кузова: 1823 мм

Расположение: Переднее/Заднее

Высота кузова: 1484 мм

Количество АТС: 1

Горящий материал: ЛВЖ(ГЖ)

Температура пламени: 1073

Степень черноты: 0,85

Параметры облучаемой поверхности

Облучаемый материал: Стеклопластик

Критический тепловой поток: 15,3 кВт/м²

Степень черноты: 0,9

Допустимая температура: 673 К

Расположение относительно изл. поверхности

☐ по центру

☒ перпендикулярно

☐ вне центра зоны

Расстояние до излучающей поверхности: 3 м

Qp: 4,308 кВт/м² < Qкр: 15,3 кВт/м² - расстояние является БЕЗОПАСНЫМ

Рассчитать Выход

Рис. 5. Пример ввода данных и результат расчета с выводом

Fig. 5. Example of data entry and calculation result with output

В данном примере расстояние между излучающей и облучаемой поверхностями, равное 10 м, является безопасным, поскольку условие выполняется $q_{\text{расч}} = 4,308 \text{ кВт/м}^2 < q_{\text{кр}} = 15,3 \text{ кВт/м}^2$. Таким образом, альтернативное нормативное противопожарное расстояние 10,0 метров является безопасным с учетом расчетного значения.

Пример (излучающая поверхность «Автобус»)

После нажатия на вкладку «Автобус» открывается содержание данной вкладки. В данной вкладке необходимо ввести параметры излучающей и облучаемой поверхности. Пример ввода исходных данных ((вид излучающей поверхности, марка АТС, тип поверхности излучения (кузов, проем) с ее значениями (ширина или длина, высота), расположение

(переднее, заднее, боковое), количество АТС, горящий материал с его значениями (температура пламени, степень черноты); облучаемый материал с учетом его значений (критический тепловой поток, степень черноты, допустимая температура), расположение облучаемого материала относительно излучающей поверхности (по центру, перпендикулярно, вне центра зоны)) для получения расчетного значения излучающего теплового потока на установленном расстоянии и последующего подбора безопасного расстояния между излучающей и облучаемой поверхностями представлен ниже (рис. 6). Согласно СП 113.13330.2016 «Стоянки автомобилей», значение противопожарного расстояния с учетом расположения 3 автобусов марки «Hyundai Aero» должно составлять 10,0 м (фасад жилого дома – стеклопластик).

Рис. 6. Пример ввода данных и результат расчета с выводом

Fig. 6. Example of data entry and calculation result with output

В данном примере расстояние между излучающей и облучаемой поверхностями, равное 10,0 м, является небезопасным, поскольку условие не выполняется $q_{\text{расч}} = 17,461 \text{ кВт/м}^2 < q_{\text{кр}} = 15,3 \text{ кВт/м}^2$. Таким образом, альтернативное нормативное противопожарное расстояние 10,0 м является небезопасным с учетом расчетного значения.

Применение информационного программного продукта позволяет провести оценку безопасного противопожарного расстояния от границ открытых площадок АТС до объектов защиты (здания, сооружения) [16, с. 67; 17, с. 58; 18, с. 12] с учетом:

- 1) типа и количества АТС;
- 2) расположения излучающей поверхности: передняя часть, боковое;
- 3) горящего материала АТС: ЛВЖ, ГЖ, СПГ, СУГ;
- 4) вида облучаемого материала (пожароопасные материалы в строительных конструкциях зданий, сооружений);

5) расположения облучаемого материала относительно излучающей поверхности (по центру, вне центра, перпендикулярно).

Для оценки оперативности при практическом применении компьютерной программы для ЭВМ «Оценка безопасного расстояния от границ открытых площадок автотранспортных средств» проведем ее сравнительный анализ с расчетной оценкой, указанной в ГОСТ 12.1.004-91 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования» [19, с. 139; 20, с. 94; 21, с. 28; 22, с. 28].

В таблице 2 представлен сравнительный анализ расчетной оценки, указанной в нормативном документе, и расчетной оценки, реализованной на основе компьютерной программы для ЭВМ, для определения оперативности их применения.

Таблица 2. Сравнительный анализ применения расчетной оценки и компьютерной программы

Table 2. Comparative analysis of the application of the estimated estimate and the computer program

Расчетная оценка Estimated estimate	Горючее вещество Combustible substance	Количество формул, ед. Number of formulas, units	Количество расчетных показателей, ед. Number of calculated indicators, units	Время, мин Time, min
Расчетная оценка (ГОСТ 12.1.004-91)	ЛВЖ, ГЖ, СПГ, СУГ	6	14	55
Расчетная оценка (компьютерная программа)	ЛВЖ, ГЖ, СПГ, СУГ	6	14	0,5

Результаты сравнительного анализа предварительной оценки воспламенения облучаемого материала от воздействия

излучающего теплового потока при горении АТС показали оперативность при практическом применении компьютер-

ной программы для ЭВМ «Оценка безопасного расстояния от границ открытых площадок автотранспортных средств» (в 110 раз уменьшается время проведения расчетного сценария).

Выводы

Для управления пожарными рисками от воздействия теплового потока при горении АТС и оценки противопожарных расстояний до соседних зданий, сооружений был разработан программный продукт «Оценка безопасного расстояния от границ открытых площадок автотранспортных средств». Его практическое применение в полевых условиях должностными лицами надзорных органов, служб пожаротушения и сотрудниками экспертных учреждений МЧС России существенно упрощает оценку, связанную с мониторингом пожароопасной обстановки и имущественным ущербом. Использование данного программного продукта предполагает его возможную интеграцию с мобильными приборными

платформами, установленными стационарно или на беспилотных авиационных системах, использующих технологии искусственного интеллекта при оценке пожарной обстановки на месте возникновения возгорания.

Результаты сравнительного анализа оперативного управления пожарными рисками, связанные с угрозой влияния излучающего теплового потока от пожара на чужое имущество, показали, что время, необходимое на проведение расчетной оценки по ГОСТ, составляет 55 мин, а по программному продукту – занимает не более 0,5 мин.

Внедрение и применение современных информационных расчетных оценок при принятии решения по обеспечению пожарной безопасности согласуется с требованиями Указа Президента РФ от 1 января 2018 г. № 2 «Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области пожарной безопасности на период до 2030 года».

Список литературы

1. Мобильная система мониторинга, раннего обнаружения и оценки пожарной опасности / М. В. Шевцов, В. В. Аксенов, Р. И. Сафронов [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 3. С. 8–25. EDN UATOJS.
2. Денисов А. Н., Нгуен Т. Т. Модель и алгоритмы задачи идентификации ситуаций при ведении действий по тушению пожара // Технологии техносферной безопасности. 2022. № 2(96). С. 151–160. <https://doi.org/10.25257/TTS.2022.2.96.151-160>. EDN VVYJZA.
3. Зайцев В. В. Противопожарные расстояния между автотранспортными средствами на открытых пространствах // Пожаровзрывобезопасность. 2006. Т. 15, № 3. С. 50–54.
4. Зайцев В. В., Исхаков Х. И., Логачев Е. Н. Пожар шин автомобиля // Системы безопасности: материалы XI научно-технической конференции. М.: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2002. С. 256–257.

5. О несущей и ограждающей качествах конструкций автомобилей / В. В. Зайцев, Х. И. Исхаков, Е. Н. Логачев, Р. Ш. Хабибулин // Системы безопасности: материалы XI научно-технической конференции. М.: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2002. С. 248–250.
6. Имитационная модель аварийного пролива горючих жидкостей на производственных объектах / И. Н. Карькин, Н. А. Контарь, С. В. Субачев, А. А. Субачева // Техносферная безопасность. 2018. № 3 (20). С. 127–132.
7. Моделирование защиты людей и оборудования от теплового потока пожара на территории производственных объектов / И. Н. Карькин, Н. А. Контарь, С. В. Субачев, А. А. Субачева // Техносферная безопасность. 2019. № 2 (23). С. 103–108.
8. Моторыгин Ю. Д., Акимов А. Б. Методика управления пожарной безопасностью на автостоянках закрытого типа // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2014. № 2. С. 29–36.
9. Кошмаров Ю. А., Башкирцев М. П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. М.: Высшая инженерная пожарно-техническая школа МВД СССР, 1987. 444 с.
10. Ройтман М. Я. Противопожарное нормирование в строительстве. М.: Высшая инженерная пожарно-техническая школа МВД СССР, 1985. 590 с.
11. Козлачков В. И., Ягодка Е. А., Волошенко А. А. Оценка пожарных разрывов с учетом воздействия теплового потока на имущество // Технологии техносферной безопасности. 2016. № 3 (67). С. 40–44.
12. Spalding D., Taborek J. Heat Exchanger Design Handbook. New York; London, 2014.
13. Лабинский А. Ю. Моделирование процесса нестационарной теплопроводности методом теплового баланса // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2019. № 4. С. 28–33.
14. Тарахно О. В., Трегубов Д. Г., Жернокльов К. В., Коврегін В. В. Основні положення процесу горіння. Виникнення процесу горіння. Харків: НУЦЗУ, 2020. 408 с.
15. Гоман П. Н., Соболевская Е. С. Разработка программы расчёта интенсивности теплового излучения при пожаре // Технологии техносферной безопасности. 2016. № 1 (65). С. 250–257.
16. Волошенко А. А. Разработка информационно-аналитической оценки противопожарного расстояния от границ открытых площадок автотранспортных средств // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сборник материалов XV Международной научно-практической конференции молодых ученых: в 2 т. Минск: Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, 2021. Т. 1, ч. 1. 316 с.
17. Волошенко А. А., Шевцов М. В. Информационно-аналитическая поддержка при оценке безопасного противопожарного расстояния между зданиями на территории промышленного назначения // Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация. 2022. № 4. С. 52–58. <https://doi.org/10.25257/FE.2022.4.52-58>.

18. Автоматизация процесса управления противопожарными расстояниями от границ открытых площадок для хранения автотранспортных средств до объектов защиты / А. А. Волошенко, Ю. В., Мельниченко П. И. Зыков, Т. В. Штеба // Техносферная безопасность. 2023. № 1 (38). С. 3–12.

19. Седнев В. А., Седнев А. В. Основы математического моделирования инженерного обеспечения действий спасательных формирований // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2020. № 4. С. 132–139.

20. Якимова Е. М. Государственный механизм защиты субъектов предпринимательской деятельности в современной России // Вестник Томского государственного университета. Право. 2018. № 28. С. 83–95. <https://doi.org/10.17223/22253513/28/8>.

21. Сметанкина Г. И., Шуткина С. А. Правовые основы совершенствования государственной надзорной деятельности в области пожарной безопасности // Наука сегодня: сборник научных трудов по материалам VII Международной научно-практической конференции. Вологда: Маркер, 2015. С. 27–28.

22. Автоматизированная система для классификации снимков видеопотоков / С. А. Филист, М. В. Шевцов, В. А. Белозеров [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 4. С. 85–105. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2021-11-4-85-105>. EDN FHIPXT.

References

1. Shevtsov M. V., Aksenov V. V., Safronov R. I., eds. Mobil'naya sistema monitoringa, rannego obnaruzheniya i otsenki pozharnoi opasnosti [Mobile monitoring system, early detection and fire hazard assessment]. *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*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 8–25. EDN UATOJS.

2. Denisov A. N., Nguyen T. T. Model' i algoritmy zadachi identifikatsii situatsii pri vedenii deistvii po tusheniyu pozhara [Model and algorithms of the problem of identifying situations when conducting fire extinguishing actions]. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti = Technosphere Safety Technologies*, 2022, no. 2 (96), pp. 151–160. <https://doi.org/10.25257/TTS.2022.2.96.151-160>. EDN VVYJZA

3. Zaitsev V. V. Protivopozharnye rasstoyaniya mezhdu avtotransportnymi sredstvami na otkrytykh prostranstvakh [Fire-fighting distances between vehicles in open spaces]. *Pozharovzryvobezopasnost' = Fire and Explosion Safety*, 2006, vol. 15, no. 3, pp. 50–54.

4. Zaitsev V. V., Iskhakov H. I., Logachev E. N. [Fire of car tires]. *Sistemy bezopasnosti. Materialy XI nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Security systems: materials of the XI Scientific and Technical Conference]. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia Publ., 2002, pp. 256–257. (In Russ.)

5. Zaitsev V. V., Iskhakov H. I., Logachev E. N., Khabibulin R. Sh. [About the bearing and enclosing qualities of car structures]. *Sistemy bezopasnosti. Materialy XI nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Security systems. Materials of the XI Scientific and Technical Conference]. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia Publ., 2002, pp. 248–250. (In Russ.)

6. Karkin I. N., Kontar N. A., Subachev S. V., Subacheva A. A. Imitatsionnaya model' avariinogo proлива goryuchikh zhidkostei na proizvodstvennykh ob'ektakh [Simulation model of an emergency spill of flammable liquids at production facilities]. *Tekhnosfernaya bezopasnost' = Technosphere Safety*, 2018, no. 3 (20), pp. 127–132.

7. Karkin I. N., Kontar N. A., Subachev S. V., Subacheva A. A. Modelirovanie zashchity lyudei i oborudovaniya ot teplovogo potoka pozhara na territorii proizvodstvennykh ob'ektov [Modeling of protection of people and equipment from the heat flow of fire on the territory of production facilities]. *Tekhnosfernaya bezopasnost' = Technosphere Safety*, 2019, no. 2 (23), pp. 103–108.

8. Motorygin Yu. D., Akimov A. B. Metodika upravleniya pozharnoi bezopasnost'yu na avtostoyankakh zakrytogo tipa [Methods of fire safety management in closed-type parking lots]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoi protivopozharnoi sluzhby MChS Rossii = Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*, 2014, no. 2, pp. 29–36.

9. Koshmarov Yu. A., Bashkirtsev M. P. Termodinamika i teploperedacha v pozharnom dele [Thermodynamics and heat transfer in fire fighting]. Moscow, Vysshaya inzhenernaya pozharno-tekhnicheskaya shkola MVD SSSR Publ., 1987. 444 p.

10. Roitman M. Ya. Protivopozharnoe normirovanie v stroitel'stve [Fire-prevention rationing in construction]. Moscow, Vysshaya inzhenernaya pozharno-tekhnicheskaya shkola MVD SSSR Publ., 1985. 590 p.

11. Kozlachkov V. I., Yagodka E. A., Voloshenko A. A. Otsenka pozharnykh razryvov s uchetom vozdeistviya teplovogo potoka na imushchestvo [Assessment of fire breaks taking into account the impact of heat flow on property]. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti = Technosphere Security Technologies*, 2016, no. 3 (67), pp. 40–44.

12. Spalding D., Taborek J. Heat Exchanger Design Handbook. New York, London, 2014.

13. Labinsky A. Yu. Modelirovanie protsessa nestatsionarnoi teploprovodnosti metodom teplovogo balansa [Modeling of the process of unsteady thermal conductivity by the method of thermal balance]. *Nadzornaya deyatel'nost' i sudebnaya ekspertiza v sisteme bezopasnosti = Supervisory Activity and Forensic Examination in the Security System*, 2019, no. 4, pp. 28–33.

14. Tarakhno O. V., Tregubov D. G., Zhernoklyov K. V., Kovregin V. V. [The main provisions of the mining process. Viniknennyya process gorinnyya]. Kharkiv, NUTsZU Publ., 2020. 408 p. (In Ukr.)

15. Homan P. N., Sobolevskaya E. S. Razrabotka programmy rascheta intensivno-sti teplovogo izlucheniya pri pozhare [Development of a program for calculating the intensity of thermal radiation in case of fire]. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti = Technosphere Safety Technologies*, 2016, no. 1 (65), pp. 250–257.

16. Voloshenko A. A. [Development of information and analytical assessment of the fire-fighting distance from the boundaries of open areas of motor vehicles]. *Obespechenie bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: problemy i perspektivy. Sbornik materialov XV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh* [Ensuring the safety of life: problems and prospects. Collection of materials of the XV International Scientific and Practical Conference of Young scientists]. Minsk, Universitet grazhdanskoi zashchity MChS Respubliki Belarus' Publ., 2021. 316 p. (In Russ.)

17. Voloshenko A. A., Shevtsov M. V. Informatsionno-analiticheskaya podderzhka pri otsenke bezopasnogo protivopozharnogo rasstoyaniya mezhdu zdaniyami na territorii promyshlennogo naznacheniya [Information and analytical support when assessing the safe fire-fighting distance between buildings on the territory of industrial use]. *Pozhary i chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie, likvidatsiya = Fires and Emergencies: Prevention, Liquidation*, 2022, no. 4, pp. 52–58. <https://doi.org/10.25257/FE.2022.4.52-58>

18. Voloshenko A. A., Melnichenko Yu. V., Zykov P. I., Shteba T. V. Avtomatizatsiya protsessa upravleniya protivopozharnymi rasstoyaniyami ot granits otkrytykh ploshchadok dlya khraneniya avtotransportnykh sredstv do ob"ektov zashchity [Automation of the process of controlling fire-fighting distances from the boundaries of open areas for the storage of vehicles to the objects of protection]. *Tekhnosfernaya bezopasnost' = Technosphere Safety*, 2023, no. 1 (38), pp. 3–12.

19. Sednev V. A., Sednev A. V. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya inzhnernogo obespecheniya deistvii spasatel'nykh formirovaniy [Fundamentals of mathematical modeling of engineering support of rescue formations' actions]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoi protivopozharnoi sluzhby MChS Rossii = Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*, 2020, no. 4, pp. 132–139.

20. Yakimova E. M. Gosudarstvennyi mekhanizm zashchity sub"ektov predprinimatel'skoi deyatel'nosti v sovremennoi Rossii [State mechanism of protection of business entities in modern Russia]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvenno-go universiteta. Pravo = Bulletin of Tomsk State University. Right*, 2018, no. 28, pp. 83–95. <https://doi.org/10.17223/22253513/28/8>

21. Smetankina G. I., Shutkina S. A. [Legal bases for improving state supervisory activities in the field of fire safety]. *Nauka segodnya. Sbornik nauchnykh trudov po materialam VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Science today. A collection of scientific papers based on the materials of the VII International Scientific and Practical Conference]. Vologda, Marker Publ., 2015, pp. 27–28. (In Russ.)

22. Filist S. A., Shevtsov M. V., Belozarov V. A., eds. Avtomatizirovannaya sistema dlya klassifikatsii snimkov videopotokov [Automated system for classifying images of video streams] *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gos-udarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, infor-matika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 85–105. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2021-11-4-85-105>. EDN FHIPXT

Информация об авторах / Information about the Authors

Алексей Анатольевич Волошенко, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры надзорной деятельности (в составе учебно-научного комплекса организации надзорной деятельности), Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: volax84@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9468-6995

Alexey A. Voloshenko, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Lecturer of the Department of Supervisory Activities (as Part of the Educational and Scientific Complex of the Organization of Supervisory Activities), Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russian Federation e-mail: volax84@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9468-6995

Максим Викторович Шевцов, кандидат технических наук, начальник учебно-методического центра, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: shevtsovmv@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5537-2392

Maxim V. Shevtsov, Cand. of Sci. (Engineering), Head of the Educational and Methodological Center The Center, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russian Federation, e-mail: shevtsovmv@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5537-2392

Денисов Алексей Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры пожарной тактики и службы (в составе учебно-научного комплекса пожаротушения), Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: dan_aleks@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2594-9389

Alexey N. Denisov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Fire Tactics and Service (as Part of the Fire Extinguishing Educational and Scientific Complex), Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russian Federation, e-mail: dan_aleks@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2594-9389

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-112-124>



Самооценка качества жизни и сформированности здорового образа жизни студентов-медиков

О. М. Шепелева¹, Л. П. Лазурина¹✉, М. П. Куркина¹, Г. С. Маль¹,
В. А. Доценко¹, К. В. Завидовская¹

¹ Курский государственный медицинский университет Минздрава России
ул. К. Маркса, д. 3, г. Курск 305041, Российская Федерация

✉ e-mail: lazurinalp@kursksmu.net

Резюме

Цель исследований заключается в анализе выборочных данных по самооценке здоровья и сформированности установок ЗОЖ студентов-медиков.

Методы. Структура выборки характеризуется распределением респондентов по полу, курсу обучения в вузе и колледже, возрасту 15–18 лет. Сбор данных осуществляли методом анкетирования с использованием прямого опроса респондентов. Выполнена антропометрия с последующим расчетом индекса массы тела (ИМТ) опрашиваемых. Оценка качества жизни проводилась с помощью опросника SF-36 по показателям физического и психического компонентов здоровья, общему состоянию здоровья, жизненной активности и психическому здоровью.

Результаты. Респонденты были разделены на 4 группы: 1 – юноши, обучающиеся в вузе; 2 – девушки, обучающиеся в вузе; 3 – юноши, обучающиеся в колледже; 4 – девушки, обучающиеся в колледже. Установлено, что обследованные девушки имеют более низкую самооценку здоровья, более 30% студенток вуза и студенток колледжа оценивают свое здоровье как посредственное и плохое, а среди юношей этот показатель составил 25,0% и 20,0% соответственно. Физический компонент здоровья незначительно отличался в группах. Психологический компонент здоровья у девушек составлял: $32,98 \pm 1,35$ в вузе и $38,98 \pm 1,14$ в колледже против $41,10 \pm 2,22$ у юношей в вузе и $44,61 \pm 2,12$ в колледже. Показатель общего состояния здоровья составлял $66,50 \pm 4,01$, $58,12 \pm 2,86$, $65,40 \pm 4,48$ и $63,85 \pm 1,95$ у представителей анализируемых групп соответственно; психического здоровья – $63,38 \pm 3,83$, $49,09 \pm 2,63$, $64,6 \pm 4,48$ и $60,34 \pm 2,21$.

Заключение. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что имеются гендерные отличия в самооценке здоровья, представленные более низкими показателями у девушек. Причем у обучающихся в вузе это проявляется более отчетливо, что требует более углубленного изучения. Установлено, что студенты-первокурсники КГМУ имеют мотивацию к ведению здорового образа жизни и его пропаганде среди населения, причем у обучающихся вуза она прослеживается более отчетливо.

© Шепелева О. М., Лазурина Л. П., Куркина М. П., Маль Г. С., Доценко В. А., Завидовская К. В., 2023

Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering,
Information Science. Medical Instruments Engineering. 2023; 13(2): 112–124

Ключевые слова: студенты; образ жизни; факторы риска; здоровье; качество жизни; питание; вредные привычки; двигательный режим.

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

Для цитирования: Самооценка качества жизни и сформированности здорового образа жизни студентов-медиков / О. М. Шепелева, Л. П. Лазурина, М. П. Куркина, Г. С. Маль, В. А. Доценко, К. В. Завидовская // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 112–124. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-112-124>.

Поступила в редакцию 17.04.2023

Подписана в печать 13.05.2023

Опубликована 30.06.2023

Self-Assessment of the Quality of Life and the Formation of a Healthy Lifestyle of Medical Students

Olga M. Shepeleva¹, Lyudmila P. Lazurina¹✉, Marina P. Kurkina¹, Galina S. Mal¹, Vladimir A. Dotsenko¹, Kseniya V. Zavidovskaya¹

¹ Kursk State Medical University of the Ministry of Health of Russia
3 K. Marx Str., Kursk 305041, Russian Federation

✉ e-mail: lazurinalp@kursksmu.net

Abstract

The purpose of research is to analyze sample data on self-assessment of health and formation of healthy lifestyle attitudes of medical students.

Methods. The sample structure is characterized by the distribution of respondents by gender, the course of study at a university and college, and the age of 15–18 years. Data collection was carried out by a questionnaire method using a direct survey of respondents. Anthropometry was performed with the subsequent calculation of the body mass index (BMI) of the respondents. The assessment of the quality of life was carried out using the SF-36 questionnaire on indicators of physical and mental components of health, general health, vital activity and mental health.

Results. The respondents were divided into 4 groups: 1 – boys studying at a university, 2 – girls studying at a university, 3 – boys studying at a college and 4 – girls studying at a college. It was found that the surveyed girls have a lower self-assessment of health, more than 30% of university and college students rate their health as mediocre and poor, and among young men this indicator was 25,0% and 20,0%, respectively. The physical component of health differed slightly in the groups. The psychological component of health in girls was: $32,98 \pm 1,35$ (in high school) and $38,98 \pm 1,14$ (in college) versus $41,10 \pm 2,22$ for boys in high school and $44,61 \pm 2,12$ in college. The indicator of the general state of health was $66,50 \pm 4,01$; $58,12 \pm 2,86$; $65,40 \pm 4,48$ and $63,85 \pm 1,95$ in representatives of the analyzed groups, respectively; mental health – $63,38 \pm 3,83$; $49,09 \pm 2,63$; $64,6 \pm 4,48$ and $60,34 \pm 2,21$.

Conclusion. Analysis of the data obtained indicates that there are gender differences in self-assessment of health, represented by lower indicators in girls. Moreover, students at the university show this more clearly, which requires more in-depth study. It has been established that first-year students of KSMU have motivation to lead a healthy lifestyle and promote it among the population, and it can be traced more clearly among students of the university.

Keywords: students; lifestyle; risk factors; health; quality of life; nutrition; bad habits; motor mode.

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

For citation: Shepeleva O. M., Lazurina L. P., Kurkina M. P., Mal' G. S., Dotsenko V. A., Zavidovskaya K. V. Self-Assessment of the Quality of Life and the Formation of a Healthy Lifestyle of Medical Students. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe*

Введение

Одной из наиболее приоритетных задач развития общества является проблема сохранения здоровья студенческой молодежи. Здоровье студентов во многом определяется социально-психологическими факторами: адаптационные способности, психоэмоциональное напряжение, образ и условия жизни, медицинская активность, учебная нагрузка, уровень доходов и др. [1; 2; 3; 4; 5].

Реформирование образовательной системы в высшей школе, интенсификация учебной деятельности и переход от традиционных форм организации учебного процесса к инновационным технологиям повысили требования к состоянию здоровья студентов [6; 7; 8; 9]. Результаты исследований НИИ гигиены и охраны здоровья детей и подростков, проводимые с целью определения современных тенденций в динамике состояния здоровья молодежи в последнее время, показали, что увеличивается заболеваемость, а также снижается уровень физического развития, изменяется структура выявленной патологии за счет роста частоты социально значимых болезней [6].

Высокоинформативным и чувствительным методом, позволяющим оценить здоровье студенческой молодежи, является исследование качества жизни. Качество жизни – важный показатель,

отражающий физическое и психическое здоровье человека, его физическую работоспособность и социальную активность, т. е. в целом отражающий благополучие человека.

По определению ВОЗ, качество жизни (КЖ), связанное со здоровьем, выделяется среди ключевых понятий современной медицины, так как позволяет дать глубокий многоаспектный анализ важных составляющих здоровья человека [10; 11; 12; 13; 14].

КЖ рассматривается как категория, включающая в себя сочетание условий жизнеобеспечения и состояния здоровья, позволяющих достичь физического, психологического и социального благополучия и самореализации [13].

Профилактика неинфекционных заболеваний, являющихся ведущими причинами смертности населения во всем мире, является одной из актуальных задач, стоящих перед современной медициной [15; 16]. Борьбе с ведущими факторами риска развития неинфекционных заболеваний в настоящее время уделяется большое внимание, и мероприятия данного направления отражены как в международных, так и отечественных программах и проектах. Так, принятый Всемирной ассамблеей здравоохранения «Глобальный план действий по профилактике неинфекционных заболеваний и борьбе с ними, г. Женева» направлен на

уменьшение доли вклада управляемых поведенческих факторов риска в развитие данных заболеваний [17]. По мнению экспертов Всемирной организации здравоохранения, влияние на факторы риска способно предотвратить около 80% болезней сердечно-сосудистой системы и сахарного диабета и около 40% онкологических заболеваний [18]. Федеральный проект «Укрепление общественного здоровья», реализуемый в рамках национального проекта «Демография», заявляет основной задачей «формирование системы мотивации граждан к здоровому образу жизни (ЗОЖ), включая здоровое питание и отказ от вредных привычек» [19].

Указанные аспекты приобретают особое значение для действующих и будущих медицинских работников, поскольку, с одной стороны, они являются лицами, на которые направлены данные проекты, а с другой – в силу специфики профессиональной деятельности должны принимать активное участие в их реализации.

Современная система медицинского образования ставит перед образовательными учреждениями качественно новые задачи, заключающиеся не только в поддержании, сохранении и укреплении собственного здоровья обучающихся, но и в развитии их способности формировать ЗОЖ среди населения. Это требование закреплено федеральными государственными образовательными стандартами высшего и среднего специального образования по различным специальностям

укрупненных групп специальностей: клиническая медицина, науки о здоровье и профилактическая медицина, фармация в виде общих, общепрофессиональных и профессиональных компетенций.

Курский государственный медицинский университет (КГМУ) является вузом здорового образа жизни. В университете действует мощная программа по формированию ЗОЖ среди студентов и сотрудников: проводятся физкультурно-оздоровительные мероприятия, мониторинг состояния здоровья студентов и сотрудников, работает центр рационального питания, центр психологической помощи, функционируют программы дополнительного образования, действуют волонтерские отряды по формированию ЗОЖ и т. д. Ежегодно студентами вуза становятся около 1000 человек из разных регионов страны, ближнего и дальнего зарубежья с разным уровнем мотивации к формированию ЗОЖ.

Учитывая вышесказанное, целью нашего исследования стало изучение исходных данных по самооценке здоровья и сформированности ЗОЖ студентов первого года обучения, получающих высшее и среднее специальное медицинское образование.

Материалы и методы

Выборку в исследовании составили студенты, обучающиеся на первых курсах университета и медико-фармацевтического колледжа. Структура выборки характеризуется распределением респондентов по полу, курсу обучения в

вузе и колледже. Сбор данных осуществляли методом анкетирования на основе использования прямого опроса респондентов. Опросник после разъяснения целей и задач исследования заполнялся респондентом самостоятельно.

Анкета включала вопросы, отражающие самооценку образа жизни, питания, вредных привычек, двигательной активности, психологического состояния респондентов. Выполнена антропометрия с последующим расчетом индекса массы тела (ИМТ). Оценка качества жизни проводилась с помощью опросника SF-36 [20] по показателям физического и психического компонентов здоровья, общему состоянию здоровья, жизненной активности и психическому здоровью. Статистическая обработка данных осуществлялась с помощью с помощью пакета прикладных программ Microsoft Office Excel 2010. Возраст обучающихся вуза составлял 17–18 лет, колледжа – 15–17 лет.

Результаты и их обсуждение

Проведено анкетирование студентов 1 курса: 98 студентов стоматологического факультета и факультета медико-профилактического дела и 95 студентов фармацевтического отделения, отделения лечебного дела и клинико-лабораторной диагностики медико-фармацевтического колледжа по специально разработанной анкете. Все респонденты были разделены на 4 группы: 1 группа – юноши, обучающиеся в вузе; 2 группа – девушки, обучающиеся в вузе; 3 группа – юноши, обучающиеся в колледже;

4 группа – девушки, обучающиеся в колледже.

В ходе опроса установлено, что 65,6% респондентов 1 группы, 53% респондентов 2 группы, 50% третьей группы и 58,8% четвертой группы считают, что они ведут ЗОЖ. При этом жизненным приоритетом «здоровье» считают 40% опрошенных 3 группы, по 56% респондентов 1 и 2 групп и 71,8% (4 группа) опрошенных. Другие респонденты отметили в качестве жизненного приоритета семью и материальное благополучие.

Оценка ИМТ выявила, что абсолютное большинство респондентов имеют нормальный ИМТ (81,3% – 1 группы, 77,3% – 2 группы, 70% – 3 группы и 63,5% – 4 группы). Среди студентов колледжа лиц с повышенным ИМТ не установлено, в группе студенток вуза – 4,5%, студентов вуза – 15,6%. Наибольшая доля лиц с избыточной массой тела выявлена среди студенток колледжа (21,2%).

46,9%, 42,4%, 60% и 40% опрошенных 1, 2, 3, 4 групп заявили, что знают и соблюдают принципы рационального питания. Однако 50% и 56,1% опрошенных 1 и 2 групп соответственно имеют 2-кратный режим питания. Ежедневное употребление фастфуда подтверждают 6,3% респондентов 1 группы и 3,1% респондентов 2 группы. В колледже этот показатель значительно выше, а именно в ежедневном меню 20% юношей и 15,3% девушек имеется фастфуд. При этом полностью отрицают употребление фастфуда 15,6%, 24,2%, 10% и 37,6%

опрошенных 1, 2, 3, 4 групп соответственно.

Услугами предприятий общественного питания регулярно пользуются от 5,9% (4 группа) до 34,4% (1 группа) респондентов. При этом в центре рационального питания КГМУ питаются от 24,2% (2 группа) до 50,6% (4 группа) опрошенных. Обращает на себя внимание низкий процент потребления овощей, которые ежедневно потребляют от 9,1% (1,2 группы) до 17,6% (4 группа) респондентов. Уровень ежедневного потребления кондитерских, мучных изделий, богатых простыми сахарами и жирами, значительно выше и колеблется от 18,2% (2 группа) до 32,9% (4 группа). Мясные и рыбные продукты в большей степени присутствуют в питании юношей: 53,1% студентов вуза и 50% студентов колледжа имеют в рационе эти продукты. У девушек данный показатель варьирует от 34,1% (колледж) до 40,9% (вуз). Существенной разницы между полами в потреблении молочной продукции не установлено. Молоко и молочные продукты имеются в ежедневном рационе 30,6–36,6% процентов опрошенных. Заинтересованность в правильном питании и желание его иметь проявляют 68,8%, 86,4%, 60% и 57,6% респондентов 1–4 групп. Оставшиеся лица не задумываются над этим вопросом.

Анализ распространенности вредных привычек показал следующие результаты. Доля курильщиков составляет 15,6% студентов и 3,0% студенток вуза и 10% студентов и 12,9% студенток колледжа. При этом ранее курили 68,8%, 37,9%, 50% и 40% опрошенных этих

групп, а на отказ от курения главным образом повлияли осознание вреда здоровью и воздействие родителей. Не реагируют на предупреждающие надписи на упаковках сигарет главным образом юноши: 70% юношей в колледже и 59,4% в вузе. Из всех курильщиков безусловно готовы отказаться от курения 60% респондентов 1 группы, 40,9% – 2 группы, 100% – 3 группы и 35,3% – 4 группы. Дополнительно на отказ 40% опрошенных 1 группы и 4,7% 4 группы могут повлиять такие обстоятельства, как запрет врача, беременность, введение налога на курение и т. п.

Употребляют алкоголь 81,3%, 74,2%, 30% и 57,6% респондентов 1, 2, 3, 4 групп соответственно. Среди алкогольных напитков преобладают пиво и слабые алкогольные напитки. Большинство опрошенных указали, что употребляют спиртное по праздникам и в выходные в компании. Наркотические вещества пробовали только обучающиеся вуза – 6,3% юношей и 1,5% девушек. В настоящее время отрицают их потребление 100% опрошенных.

Достаточным считают свой режим двигательной активности 37,5%, 27,3%, 40% и 56,5% опрошенных 1, 2, 3, 4 групп соответственно, однако, регулярные физические упражнения отмечаются лишь у 28,1%, 22,7%, 50%, 44,7% респондентов данных групп. При этом 65,6%, 56,1%, 30% и 40% опрошенных сказали о снижении двигательной активности после поступления в учебное заведение, а 21,9%, 28,7%, 50% и 34,1% – об её увеличении. У остальных опрошенных двигательный режим не изменился.

Среди побуждающих факторов к регулярным занятиям физическими упражнениями на 1 месте стоит здоровье (43,5–50% опрошенных), далее следует поддержание внешнего вида (от 36,5% до 39,4%). Остальные респонденты занимаются ради достижения спортивных результатов или просто «за компанию».

Основными причинами гипокинезии, по мнению респондентов, являются усталость (56,2%, 45,5%, 30,0% и 24,7% опрошенных 1–4 групп соответственно) и отсутствие времени (28,1%, 19,7%, 20,0%, 31,8%). Отсутствие желания заниматься как причину недостаточной двигательной активности отметили 6,3% 24,2%, 20% и 23,5% опрошенных 1, 2, 3, 4 групп соответственно.

При этом большая часть респондентов проводят 3 и более часа в будние дни за компьютером и другими гаджетами: 71,9% опрошенных 1 группы, 86,4% – 2 группы, 90,0% – 3 группы и 64,7% – 4 группы. В выходные дни этот показатель увеличивается как для числа опрошенных, так и для времени работы. Причем, если абсолютное большинство обучающихся вуза посвящает данное время подготовке к занятиям (87,5% и 84,8% респондентов 1 и 2 групп соответственно), то только 20,0% юношей и 50,6% девушек, обучающихся колледжа, затрачивает это время на учебный процесс. Остальные респонденты проводят время в социальных сетях, за просмотром фильмов, играют. Об увеличении своей двигательной активности при условии отсутствия современных гаджетов заявили 59,4%, 45,5%, 20,0%, 57,6% опрошенных 1–4 групп.

Большинство респондентов пожаловались на нарушение режима сна. Так, полноценный 8-часовой сон отметили только 7,6% студенток вуза, 20% студентов колледжа и 70% студентов колледжа. 31,3% и 68,7% юношей, обучающихся по программам высшего образования, имеют 6–7- и 5-часовой сон соответственно. 54,5% студенток вуза отмечают 5-часовой сон, а 37,9% – 6–7-часовой. Несколько лучше ситуация в колледже. 5-часовой сон отмечается у 14,1% опрошенных девушек и 10% юношей, а 6–7-часовой – у 20,0% и 65,9% соответственно. Основными причинами недосыпания опрошенные считают большую учебную нагрузку (65,6–81,8% в вузе и 41,2–60,0% в колледже) и нерациональное распределение времени (13,6–21,9% – в вузе и 30,0–48,2% – в колледже).

Также учебная нагрузка и связанные с ней трудности являются основными причинами стресса среди обучающихся всех исследованных групп (68,7%, 56,2%, 50,0%, 75,3%). Среди других причин опрошенные отметили материальное благополучие (от 6,3% до 20%), состояние здоровья (от 3,1% до 12,5%), проблемы в семье (2,3–15,6%) и коллективе (2,4–12,5%). При этом частота возникновения стрессовых ситуаций в большинстве случаев составляет несколько раз в неделю.

Свое согласие с тем, что пропаганда ЗОЖ является необходимым аспектом будущей профессиональной деятельности, выразили 50,0% респондентов 1 группы, 60,6% – второй, 20,0% – третьей и 42,4% – четвертой, а отрицают

его 31,3%, 9,1%, 30,0% и 10,6% респондентов соответственно. Однако 53,1%, 40,9%, 50,0% и 60,0% участников 1–4 групп считают пропаганду ЗОЖ неэффективной. При этом среди не считающих пропаганду ЗОЖ необходимым элементом профессиональной деятельности выполнять данный вид работы согласны от 3,5% до 24,7% обследуемых при наличии свободного времени или за дополнительную оплату. Наиболее эффективной считают пропаганду ЗОЖ в сети Интернет или средствах массовой информации от 34,1% до 37,5% опрошенных.

Анализ самооценки состояния здоровья первокурсников показал, что обследованные девушки имеют более низкую самооценку здоровья. Так, более их трети (33,4% студенток вуза и 34,2% студенток колледжа) оценивают свое здоровье как посредственное и плохое. Среди юношей этот показатель составил 25,0% и 20,0% соответственно. Физический компонент здоровья незначительно отличался в группах и составлял ($M \pm m$): $50,65 \pm 1,46$ – для респондентов 1-й группы; $49,08 \pm 1,0$ – 2-й, $51,99 \pm 1,98$ – 3-й и $52,21 \pm 0,72$ – 4-й. В оценке психологического компонента здоровья и жизненной активности отмечались гендерные различия, а именно девушки имели более низкий показатель. Психологический компонент здоровья у девушек составлял: $32,98 \pm 1,35$ в вузе и $38,98 \pm 1,14$ в колледже против $41,10 \pm 2,22$ у юношей в вузе и $44,61 \pm 2,12$ в колледже; жизненная активность – $40,38 \pm 2,78$ и $51,89 \pm 1,9$ у

студенток вуза и колледжа соответственно; $50,31 \pm 3,78$ и $62,00 \pm 5,12$ – у исследуемых 1 и 3 групп соответственно. Показатель общего состояния здоровья составлял $66,50 \pm 4,01$, $58,12 \pm 2,86$, $65,40 \pm 4,48$ и $63,85 \pm 1,95$ у представителей 1, 2, 3, 4 групп соответственно; психического здоровья – $63,38 \pm 3,83$, $49,09 \pm 2,63$, $64,6 \pm 4,48$ и $60,34 \pm 2,21$ – у обследуемых тех же групп. Исходя из вышесказанного можно заключить, что имеются некоторые гендерные отличия в самооценке здоровья, представленные более низкими исследованными показателями у девушек. Причем у обучающихся в вузе это проявляется более отчетливо, что требует более углубленного изучения.

Выводы

Таким образом, студенты-первокурсники КГМУ имеют мотивацию к ведению здорового образа жизни и его пропаганде среди населения, причем у обучающихся вуза она прослеживается более отчетливо. Однако у части респондентов сохраняются факторы риска, требующие наблюдения и коррекции, что может в последующем отрицательно сказаться на их здоровье. Особого внимания требуют обучающиеся колледжа, возрастные особенности которых имеют больший диапазон воздействия и которые в настоящее время подвержены большому числу факторов риска и имеют меньшую, по сравнению со студентами вуза, мотивацию по формированию ЗОЖ среди населения.

Список литературы

1. Горбач Н. А., Жарова А. В., Лисняк М. А. Перспективы использования метода оценки качества жизни в формировании здоровья студентов вузов // *Здравоохранение Российской Федерации*. 2007. № 2. С. 43–46.
2. Оценка показателей качества жизни студентов медицинского вуза / В. И. Горбунов, Г. В. Возженникова, И. Н. Исаева, А. С. Верушкина // *Ульяновский медико-биологический журнал*. 2021. № 1. С. 46–49.
3. Применение показателей качества жизни студентов медицинского университета для диагностики нарушений здоровья / Т. Р. Зулькарнаев, А. И. Лукманова, Е. А. Поварго, А. Т. Зулькарнаева // *Медицина труда и экология человека*. 2015. № 4. С. 123–127.
4. Агаджанян Н. А., Радыш И. В. Качество и образ жизни студенческой молодежи // *Экология человека*. 2009. № 5. С. 3–8.
5. Качество жизни и медико-социальные особенности российских подростков, обучающихся в разных образовательных учреждениях / В. Р. Кучма, Е. И. Шубочкина, В. Ю. Иванов, Е. М. Ибрагимова // *Acta Biomedica Scientifica*. 2013. № 3(1). С. 75–80.
6. Современные тенденции динамики состояния здоровья подростков / А. Г. Ильин, И. В. Звезда, М. М. Эльянов, И. К. Раппопорт // *Гигиена и санитария*. 2000. № 1. С. 59–62.
7. Новик А. А., Ионова Т. И. Руководство по исследованию качества жизни в медицине. М.: ОЛМА Медиа Групп, 2007. С. 18–22.
8. Русакова Л. Т. Обоснование интегрального показателя качества жизни населения // *Гигиена и санитария*. 2006. № 5. С. 68–70.
9. Ушаков И. Б., Соколова Н. В. Современные проблемы качества жизни студентов // *Гигиена и санитария*. 2007. № 1. С. 56–58.
10. Новик А. А., Ионова Т. И., Кайнд П. Концепция исследования качества жизни в медицине. СПб.: Элби, 1999. 140 с.
11. Новик А. А., Ионова Т. И. Руководство по исследованию качества жизни в медицине / под ред. Ю. Л. Шевченко. 2-е изд. М.: ОЛМА Медиа Групп, 2007. 320 с.
12. О проблемах глобальной стратегии ВОЗ по достижению здоровья для всех в XXI веке // *Вопросы экономики и управления для руководителей здравоохранения*. 2002. № 4 (28). С. 26–27.
13. Показатели качества жизни населения Санкт-Петербурга / А. А. Новик [и др.] // *Проблемы стандартизации в здравоохранении*. 2001. № 4. С. 22–31.
14. Сергиенко В. И., Бондарева И. Б. Математическая статистика в клинических исследованиях. М.: ГЭОТАР МЕДИЦИНА, 2000. 256 с.
15. Таранцова А. В. Нездоровое питание молодежи – фактор риска хронических неинфекционных заболеваний нации // *Евразийский кардиологический журнал*. 2016. № 3. С. 107.

16. Каприн А. Д., Александрова Л. М., Старинский В. В. Медико-социальные аспекты формирования в России концепции здорового образа жизни // Русский медицинский журнал. 2017. № 25(14), С. 995–999.

17. Глобальный план действий по профилактике неинфекционных заболеваний и борьбе с ними на 2013–2020 гг. URL: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/94384/9789244506233_rus.pdf;jsessionid=9216B53BAFE8D880A7F34D8AEFD67164?sequence=5 (дата обращения: 10.03.2023).

18. Доклад о ситуации в области неинфекционных заболеваний в мире. URL: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/148114/6/WHO_NMH_NVI_15.1_rus.pdf?ua=1 (дата обращения: 10.03.2023).

19. Паспорт национального проекта «Демография». URL: <http://static.government.ru/media/files/Z4OMjDgCaeohKWA0psu6lCekd3hwx2m.pdf> (дата обращения: 07.03.2023).

20. Sagatov I. Ye. Health-related life quality of practically healthy people residing in Almaty city (Kazakhstan) // Medical and Health Science Journal. 2010. N 4. P. 99–100.

References

1. Gorbach N. A., Zharova A.V., Lisnyak M. A. Perspektivy ispol'zovaniya metoda otsenki kachestva zhizni v formirovaniy zdorov'ya studentov vuzov [Prospects of using the method of assessing the quality of life in the formation of health of university students]. *Zdravookhranenie Rossiiskoi Federatsii = Healthcare of the Russian Federation*, 2007, no. 2, pp. 43–46.

2. Gorbunov V. I., Vozzhennikova G. V., Isaeva I. N., Verushkina A. S. Otsenka pokazatelei kachestva zhizni studentov meditsinskogo vuza [Assessment of quality of life indicators of medical university students]. *Ul'yanovskii mediko-biologicheskii zhurnal = Ulyanovsk Medico-Biological Journal*, 2021, no. 1, pp. 46–49.

3. Zulkarnaev T. R., Lukmanova A. I., Povargo E. A., Zulkarnaeva A. T. Primenenie pokazatelei kachestva zhizni studentov meditsinskogo universiteta dlya diagnostiki narushenii zdorov'ya [Application of quality of life indicators of medical university students for the diagnosis of health disorders]. *Meditsina truda i ekologiya cheloveka = Occupational Medicine and Human Ecology*, 2015, no. 4, pp. 123–127.

4. Aghajanyan N. A., Radysh I. V. Kachestvo i obraz zhizni studencheskoi molodezhi [Quality and lifestyle of student youth]. *Ekologiya cheloveka = Human Ecology*, 2009, no. 5, pp. 3–8.

5. Kuchma V. R., Shubochkina E. I., Ivanov V. Yu., Ibragimova E. M. Kachestvo i obraz zhizni studencheskoi molodezhi [The quality of life of medico-social and features of Russian adolescents studying in different educational institutions]. *Acta Biomedica Scientifica*, 2013, no. 3(1), pp. 75–80.

6. Ilyin A. G., Zvezdina I. V., Elyanov M. M., Rappoport I. K. Sovremennye tendentsii dinamiki sostoyaniya zdorov'ya podrostkov [Modern trends in the dynamics of adolescent health]. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*, 2000, no. 1, pp. 59–62.

7. Novik A. A., Ionova T. I. Rukovodstvo po issledovaniyu kachestva zhizni v meditsine [Guidelines for the study of quality of life in medicine]. Moscow, OLMA Media Group Publ., 2007, pp. 18–22.
8. Rusakova L. T. Obosnovanie integral'nogo pokazatelya kachestva zhizni naseleniya [Substantiation of the integral indicator of the quality of life of the population]. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*, 2006, no. 5, pp. 68–70.
9. Ushakov I. B., Sokolova N. V. Sovremennye problemy kachestva zhizni studentov [Modern problems of quality of life of students]. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*, 2007, no. 1, pp. 56–58.
10. Novik A. A., Ionova T. I., Kaind P. Kontseptsiya issledovaniya kachestva zhizni v meditsine [The concept of quality of life research in medicine]. St. Petersburg, Elbi Publ., 1999. 140 p.
11. Novik A. A., Ionova T. I. Rukovodstvo po issledovaniyu kachestva zhizni v meditsine [Guidelines for the study of quality of life in medicine]; ed. by Yu. L. Shevchenko. 2nd ed. Moscow, OLMA Media Group Publ., 2007. 320 p.
12. O problemakh global'noi strategii VOZ po dostizheniyu zdorov'ya dlya vseh v XXI veke [On the task of a global growth strategy to strengthen health for all in the XXI century]. *Voprosy ekonomiki i upravleniya dlya rukovoditelei zdravookhraneniya = Issues of Ecology and Management for Health Managers*, 2002, no. 4 (28), pp. 26–27.
13. Novik A. A., eds. Pokazateli kachestva zhizni naseleniya Sankt-Peterburga [Indicators of the quality of life of the population of St. Petersburg]. *Problemy standartizatsii v zdravookhranении = Problems of Standardization in Healthcare*, 2001, no. 4, pp. 22–31.
14. Sergienko V. I., Bondareva I. B. Matematicheskaya statistika v klinicheskikh issledovaniyakh [Mathematical statistics in clinical research]. Moscow, GEOTAR MEDICINE Publ., 2000. 256 p.
15. Tarantsova A. V. Nezdorovoe pitanie molodezhi – faktor riska khronicheskikh neinfektsionnykh zabolevaniy natsii [Unhealthy nutrition of youth – a risk factor for chronic non-communicable diseases of the nation]. *Evrasiiskii kardiologicheskii zhurnal = Eurasian Cardiological Journal*, 2016, no. 3, p. 107.
16. Kaprin A. D., Alexandrova L. M., Starinsky V. V. Mediko-sotsial'nye aspekty formirovaniya v rossii kontseptsii zdorovogo obraza zhizni [Medical and social aspects of the formation of the concept of a healthy lifestyle in Russia]. *Russkii meditsinskii zhurnal = Russian Medical Journal*, 2017, no. 25(14), pp. 995–999.
17. Global'nyi plan deistvii po profilaktike neinfektsionnykh zabolevaniy i bor'be s nimi na 2013–2020 gg. [Global Action Plan for the Prevention and Control of Noncommunicable Diseases for 2013–2020]. Available at: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/94384/9789244506233_rus.pdf;jsessionid=9216B53BAFE8D880A7F34D8AEFD67164?sequence=5. (accessed 10.03.2023)

18. Doklad o situatsii v oblasti neinfektsionnykh zabolevanii v mire [Report on the situation in the field of non-communicable diseases in the world]. Available at: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/148114/6/WHO_NMH_NVI_15.1_rus.pdf?ua=1. (accessed 10.03.2023)

19. Pasport natsional'nogo proekta "Demografiya" [Passport of the national project "Demography"]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/Z4OMjDgCaeohKWaA0psu6lCekd3h wx2m.pdf>. (accessed 07.03.2023)

20. Sagatov I. Ye. Health-related quality of life of practically healthy people living in Almaty (Kazakhstan). *Medical Scientific Journal*, 2010, no. 4, pp. 99–100.

Информация об авторах / Information about the Authors

Шепелева Ольга Михайловна, кандидат медицинских наук, доцент кафедры общей гигиены, Курский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: shepelevaom@kursksmu.net, ORCID: 0000-0001-8502-0817 Scopus ID: 56676366400

Olga M. Shepeleva, Cand. of Sci. (Medical), Associate Professor of the Department of General Hygiene, Kursk State Medical University of the Ministry of Health of Russia, Kursk, Russian Federation, e-mail: shepelevaom@kursksmu.net, ORCID: 0000-0001-8502-0817 Scopus ID: 56676366400

Лазурина Людмила Петровна, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой биологической и химической технологии, Курский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: lazurinalp@kursksmu.net, ORCID: 0000-0003-1937-1453, Scopus ID: 55924214100

Lyudmila P. Lazurina, Dr. of Sci. (Biology), Professor, Head of the Department of Biological and Chemical Technology, Kursk State Medical University of the Ministry of Health of Russia, Kursk, Russian Federation, e-mail: lazurinalp@kursksmu.net, ORCID: 0000-0003-1937-1453, Scopus ID: 55924214100

Куркина Марина Петровна, кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой экономики и менеджмента, Курский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kurkinamp@kursksmu.net, ORCID: 0000-0002-7961-2610

Marina P. Kurkina, Cand. of Sci. (Economics), Associate Professor, Head of the Department of Economics and Management, Kursk State Medical University of the Ministry of Health of Russia, Kursk, Russian Federation, e-mail: kurkinamp@kursksmu.net, ORCID: 0000-0002-7961-2610

Маль Галина Сергеевна, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой фармакологии, Курский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: malgs@kursksmu.net, ORCID: 0000-0003-2723-781X, Scopus ID: 6506311464

Доценко Владимир Анатольевич, студент педиатрического факультета, Курский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: v.doczenko@gmail.com, ORCID: 0009-0004-8515-7476

Завидовская Ксения Викторовна, ассистент кафедры биологической и химической технологии, Курский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: knvz@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0786-4533

Galina S. Mal, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Head of the Department of Pharmacology, Kursk State Medical University of the Ministry of Health of Russia, Kursk, Russian Federation, e-mail: malgs@kursksmu.net, ORCID: 0000-0003-2723-781X, Scopus ID: 6506311464

Vladimir A. Dotsenko, Student of the Pediatric Faculty, Kursk State Medical University of the Ministry of Health of Russia, Kursk, Russian Federation, e-mail: v.doczenko@gmail.com, ORCID: 0009-0004-8515-7476

Ksenia V. Zavidovskaya, Assistant of the Department of Biological and Chemical Technology, Kursk State Medical University of the Ministry of Health of Russia, Kursk, Russian Federation, e-mail: knvz@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0786-4533

Система электронной аускультации: метод измерения амплитудно-частотных характеристик стетоскопов

А. О. Макалов¹, В. А. Смирнов¹, А. В. Прохорцов¹ ✉

¹ Тульский государственный университет
пр-т Ленина, д. 92, г. Тула 300012, Российская Федерация

✉ e-mail: proxav@rambler.ru

Резюме

Цель исследования заключается в разработке метода измерения АЧХ классических и электронных стетоскопов. Произведено апробирование предложенного метода. Выполнены измерения АЧХ классического и электронного стетоскопов. Реализовано изменение конструкции головки электронного стетоскопа с целью улучшения ее функционирования. Для обоснования внесенных изменений конструкции осуществлено сравнение АЧХ исходной и улучшенной конструкции, повышение разнообразия конструкций систем электронной аускультации с измеренными характеристиками и апробированием. Серия статей включает в себя разработку модели системы электронной аускультации, разработку конструкции электронного стетоскопа, изготовление экспериментального образца, разработку методики измерения амплитудно-частотных характеристик электронных и классических стетоскопов, апробирование предложенных моделей и методов, анализ аускультативных данных.

Методы. Исследования базировались на методиках измерения частотных характеристик электроакустических преобразователей, предложенных в межгосударственных стандартах. На основе методик в межгосударственных стандартах разработан упрощенный метод измерения амплитудно-частотных характеристик электронных стетоскопов. В исследовании использовалось следующее оборудование: излучатель «Искусственный рот» Type 4227 фирмы Bruel&Kjaer; измерительный конденсаторный микрофон «Искусственное ухо» Type 4146 с эталонной камерой 2CC фирмы Bruel&Kjaer; анализатор Type 2118 фирмы Bruel&Kjaer.

Результаты. Получены амплитудно-частотные характеристики классического и электронного стетоскопов. Улучшена конструкция головки электронного стетоскопа, произведено сравнение амплитудно-частотных характеристик исходной и улучшенной конструкции.

Заключение. Предложен метод измерения параметров частотных характеристик уровня звукового давления классических и электронных стетоскопов. Метод максимально приближен к стандартизированным методам контроля акустических параметров, при этом обладает достаточной простотой и дешевизной относительно метода измерения по давлению, демонстрируя качественную схожесть результатов измерений.

Ключевые слова: система электронной аускультации; электронный стетоскоп; измерение амплитудно-частотной характеристики; измерение чувствительности; уровень звукового давления.

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

Для цитирования: Макалов А. О., Смирнов В. А., Прохорцов А. В. Система электронной аускультации: метод измерения амплитудно-частотных характеристик стетоскопов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 125–136. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-125-136>.

Поступила в редакцию 05.04.2023

Подписана в печать 30.05.2023

Опубликована 30.06.2023

Electronic Auscultation System: a Method for Measuring the Amplitude-Frequency Characteristics of Stethoscopes

Alexey O. Makalov¹, Vladimir A. Smirnov¹, Alexey V. Prokhortsov¹ ✉

¹ Tula State University
92 Lenin Ave., Tula 300012, Russian Federation

✉ e-mail: proxav@rambler.ru

Abstract

The purpose of research is increasing the diversity of designs of electronic auscultation systems with measured characteristics and testing. A series of articles includes the development of a model of an electronic auscultation system, the development of an electronic stethoscope design, the manufacture of an experimental sample, the development of a method for measuring the amplitude-frequency characteristics of electronic and classical stethoscopes, testing the proposed models and methods, and analyzing auscultatory data. The article proposes a method for measuring the frequency response of classical and electronic stethoscopes. The proposed method was tested. The frequency response of classical and electronic stethoscopes was measured. The design of the head of the electronic stethoscope has been improved, the frequency response of the original and improved designs has been compared.

Methods. The studies were based on methods for measuring the frequency characteristics of electroacoustic transducers proposed in interstate standards. On the basis of methods in interstate standards, a simplified method for measuring the amplitude-frequency characteristics of electronic stethoscopes has been developed. The following equipment was used in the study: Type 4227 "Artificial Mouth" emitter from Bruel & Kjaer; measuring condenser microphone "Artificial ear" Type 4146 with a 2CC reference chamber from Bruel & Kjaer; Type 2118 analyzer from Bruel & Kjaer.

Results. The amplitude-frequency characteristics of classical and electronic stethoscopes are obtained. The design of the electronic stethoscope head has been improved, the amplitude-frequency characteristics of the original and improved designs have been compared.

Conclusion. A method for measuring the parameters of the frequency characteristics of the sound pressure level of classical and electronic stethoscopes is proposed. The method is as close as possible to the standardized methods for monitoring acoustic parameters, while being sufficiently simple and cheap compared to the pressure measurement method, demonstrating the qualitative similarity of the measurement results.

Keywords: electronic auscultation system; electronic stethoscope; frequency response measurement; sensitivity measurement; sound pressure level.

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

For citation: Makalov A. O., Smirnov V. A., Prokhortsov A. V. Electronic Auscultation System: a Method for Measuring the Amplitude-Frequency Characteristics of Stethoscopes. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest*

Введение

Производство систем электронной аускультации требует контроля амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) акустической и электронных частей. На сегодняшний день предложен только один метод измерения АЧХ акустической части стетоскопов [1; 2; 3]. Данный метод предполагает измерение частотной характеристики чувствительности датчиков электронной аускультации по давлению. Для этого используется камера замкнутого объема. Недостатком данного метода является малый верхний частотный предел измерений (1000 Гц) в результате отражения звуковых волн от стенок камеры и возникновения интерференционной картины. При этом общий диапазон акустической работы дыхания (АРД), на котором регистрируются различные шумы, составляет 200 Гц – 12,6 кГц [4], например, в [5] исследуются высокочастотные гармоники шумов форсированного выдоха. Для корректировки и исследований частотных характеристик головок стетоскопов требуется производить измерения на как можно большем диапазоне частот. В данной статье предложены методика измерения АЧХ электроакустической части и результаты экспериментальных исследований ряда стетоскопов по предлагаемой методике.

Материалы и методы

Головку электронного стетоскопа следует рассматривать как устройство

костной проводимости, так как имеет непосредственный контакт с телом пациента.

Измерения электроакустического преобразователя (ЭАП) костного проведения требуют использования специфического, достаточно редкого и дорогостоящего оборудования, связанного с обеспечением виброизмерений. Исходя из более широкого распространения и меньшей стоимости оборудования для измерений ЭАП воздушного проведения на данном этапе развития приборов электронной аускультации выглядит более рациональным использование последних. При этом необходимо учитывать, что такая методика должна быть по возможности максимально приближена по своей сути к виброизмерениям.

На сегодняшний день в области электроакустики наиболее широко применяются следующие стандарты, содержащие в себе методики измерений электроакустических преобразователей и устройств:

- ГОСТ Р 51024-2012. Аппараты слуховые электронные реабилитационные. Технические требования и методы испытаний.
- ГОСТ Р 53576-2009 (МЭК 60268-4-2004). Микрофоны. Методы измерения электроакустических параметров.
- ГОСТ 6343-74. Телефоны. Методы измерения электроакустических преобразователей.
- ГОСТ 6496-81. Ларингофоны. Методы измерения электроакустических параметров.

В ГОСТ Р 51024 описываются методы измерений как преобразователей костного проведения, так и воздушного, но уделяется основное внимание последним. В ГОСТ Р 53576 и ГОСТ 6343-74 рассматриваются исключительно устройства воздушного проведения, в ГОСТ 6496-81 – костного. Для измерения частотной характеристики чувствительности преобразователей воздушного проведения в ГОСТ Р 53576-2009 предлагаются следующие варианты:

1. Измерение чувствительности по свободному полю.
2. Измерение чувствительности по диффузному полю.
3. Измерение чувствительности по давлению.

Метод измерения чувствительности по давлению наиболее приближен к условиям работы стетоскопа, но требует разработки камеры малого объема для рабочего диапазона частот (200 Гц – 12,6 кГц) и в дальнейшем её поверки, что является трудоемкой конструкторской задачей. Для измерения чувствительности по свободному полю требуется заглушенная камера. Методика измерений в свободном поле звукомерной заглушенной камеры или установки «бесконечная труба» по п. 7.2 ГОСТ Р 53576-2009 должна быть отброшена как неподходящая из-за отсутствия стоячих волн и реакции ЭАП на отражения.

В основе метода принято решение использовать методику измерения парфонической чувствительности (п. 7.3.1 ГОСТ Р 53576-2009), несколько преобразовав под задачи измерения АЧХ стетоскопов.

В случае проведения врачом аускультации с использованием классического стетоскопа оливы оголовья вставляются непосредственно в ушные каналы. Звук проходит через акустическую головку, звукопроводящую трубку, акустический канал оголовья и попадает непосредственно в объем среднего уха. Соответственно требуется измерение характеристики звукового давления на барабанной перепонке. Для имитации человеческого уха при измерениях по ГОСТ Р 51024-2012 должна использоваться эталонная камера с эффективным объемом 2 см^3 , соединенная с измерительным микрофоном (имитатор внутреннего уха) для измерения параметров слуховых аппаратов и телефонов с ушными вкладышами ГОСТ Р МЭК 60318-5-2010.

В этом случае акустический канал оголовья герметично соединяется с внутренним объемом эталонной камеры (2 см^3) посредством акустического соединителя, а мембрана акустической головки озвучивается сигналом прибора «рот искусственный» с минимально возможным расстоянием (например, при соединении мембраны с защитной решеткой «рта искусственного»). При этом частотная характеристика звукового давления, создаваемого прибором, должна быть учтена при обработке результатов измерений, если при их проведении не используется система стабилизации звукового давления (п. 5.9.3 ГОСТ Р 53576). На рисунке 1 изображена структурная схема предложенной методики измерения.

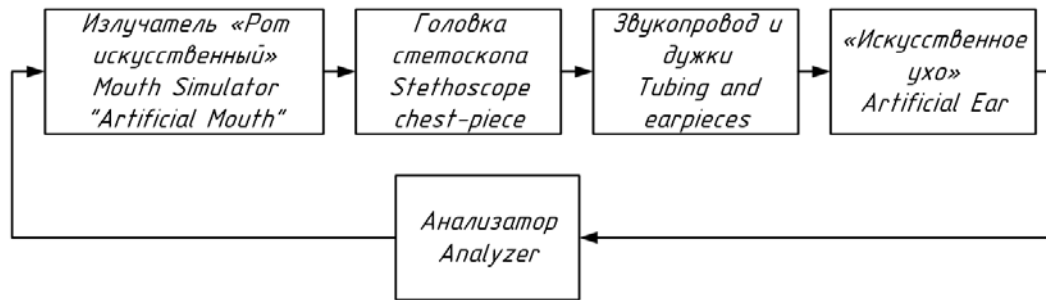


Рис. 1. Структурная схема измерения АЧХ классического стетоскопа

Fig. 1. Structural diagram for measuring the frequency response of a classic stethoscope

Следует отметить, что измерения по предложенной методике отражают действительную картину звукового давления в области барабанной перепонки человеческого уха в диапазоне 100 Гц – 10 кГц ввиду акустических ограничений измерительной аппаратуры.

Для измерения частотной характеристики уровня звукового давления (ЧХ УЗД) классического стетоскопа Little Doctor LD Special по разработанной методике использовалось следующее измерительное оборудование:

1. Излучатель «Искусственный рот» Type 4227 фирмы Bruel&Kjaer.

2. Измерительный конденсаторный микрофон «Искусственное ухо» Type 4146 с эталонной камерой 2СС фирмы Bruel&Kjaer.

3. Анализатор Type 2118.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим результаты измерения ЧХ УЗД классического стетоскопа по предложенной методике (рис. 2).

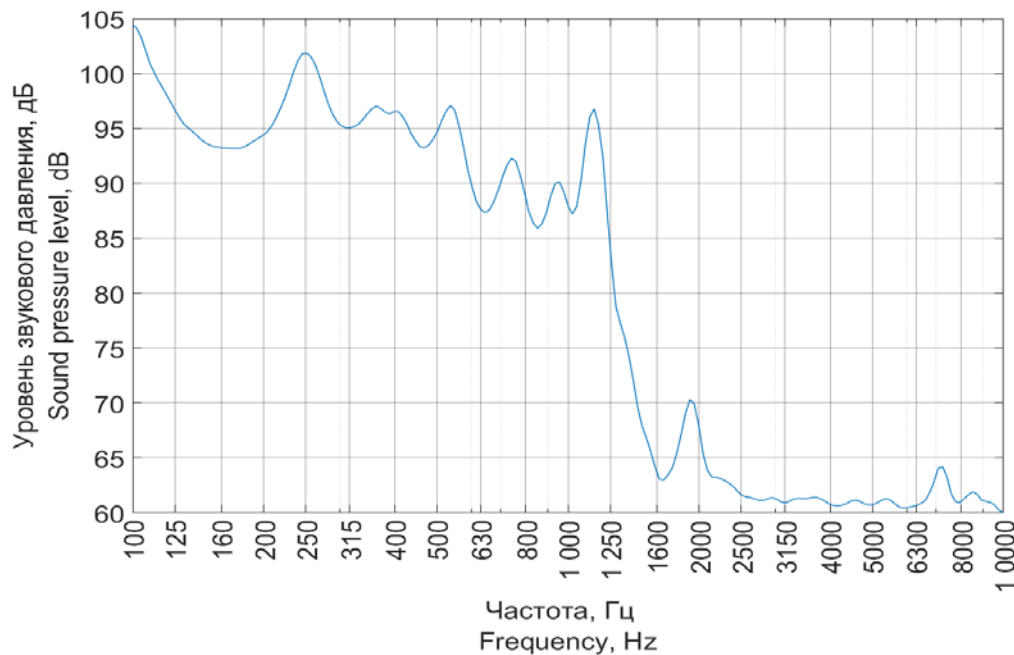


Рис. 2. Частотная характеристика уровня звукового давления стетоскопа Little Doctor LD Special

Fig. 2. Frequency response of the sound pressure level of the Little Doctor LD Special stethoscope

АЧХ (рис. 2) демонстрирует высокую неравномерность в диапазоне от 100 до 1250 Гц, что является результатом интерференции волн в звукопроводе. Данная картина связана с особенностями передаточной функцией гибкого звукопровода, параметры которой зависят от его длины, толщины стенок, внутреннего диаметра и свойств материала. Гибкость стенок звуковода приводит к тому, что собственная частота системы «головка – звуковод – ухо» мала и может находиться в начале рабочего диапазона частот (50–100 Гц), в результате чего наблюдается интерференционная картина на приемной части системы.

Также следует отметить схожесть результатов разработанного метода измерений с методом, используемым в [6; 7; 8; 9]. В статье описывается метод измерения частотной характеристики чувствительности по давлению при помощи использования камеры малого объема (ГОСТ Р 53576-2009) и электростатического излучателя. Согласно описанной методике [6], в структурной схеме на рисунке 1 излучатель «Искусственный рот» заменяется на электростатический излучатель, герметично соединенный с камерой малого объема, остальные функциональные элементы остаются неизменными. Для правильного измерения по данному методу головку стетоскопа следует плотно соединить с камерой малого объема. Таким образом, результаты измерений АЧХ стетоскопа по предложенному в данной статье методу схожи с методом измерения по давлению приведенном в публикации [6].

Для измерения частотной характеристики уровня звукового давления (ЧХ

УЗД) системы электронной аускультации [7; 10; 11] по разработанной методике использовалось аналогичное измерительное оборудование, кроме искусственного уха. В качестве искусственного уха использовался измерительный конденсаторный микрофон «Искусственное ухо» Type 4153 фирмы Bruel&Kjaer с акустической камерой связи, соответствующей ГОСТ Р МЭК 60645-1-2017. Для измерений использовалось два варианта головок электронного стетоскопа – без мембраны и с мембраной от классического стетоскопа Little Doctor LD Special. Результаты измерений представлены ниже (рис. 3).

Частотная характеристика головки электронного стетоскопа с мембраной имеет два выраженных резонанса на частотах около 950 Гц и около 2000 Гц, что объясняется резонансными характеристиками замкнутой мембраной полости головки стетоскопа [11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20]. Уменьшить неравномерность АЧХ и уровень резонанса можно, уменьшив жесткость мембраны и добавив небольшое отверстие между внешней средой и полостью головки стетоскопа на её задней стенке. После второго резонанса чувствительность заметно падает.

Электронный стетоскоп без мембраны в области до 2000 Гц имеет меньшую неравномерность АЧХ, по сравнению стетоскопа с мембраной, хотя и немного меньшую (примерно на 5 дБ) чувствительность. В области частот выше 4000 Гц электронный стетоскоп без мембраны имеет заметный подъем АЧХ, что также объясняется резонансом полости головки.

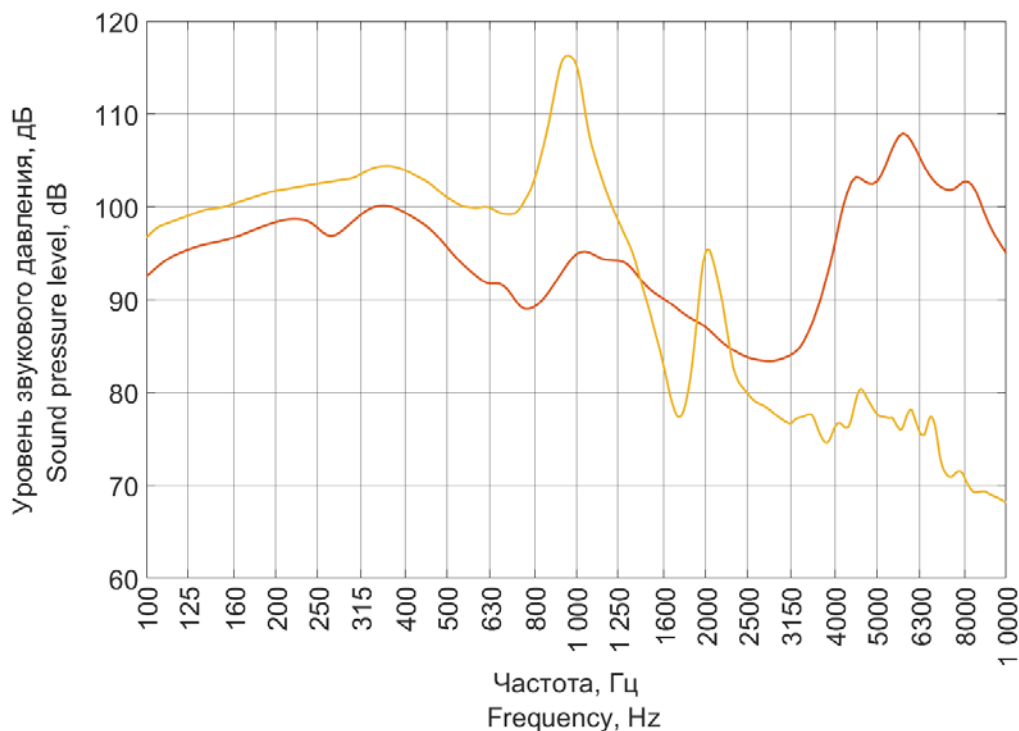


Рис. 3. Частотная характеристика уровня звукового давления системы электронной аускультации: желтый – головка электронного стетоскопа с мембраной LD Special; красный – головка электронного стетоскопа без мембраны

Fig. 3. Frequency response of the sound pressure level of the electronic auscultation system: yellow – electronic stethoscope head with LD Special membrane; red – electronic stethoscope head without membrane

Сравнение обычного стетоскопа с электронным показывает, что в области частот выше 2 кГц чувствительность электронного стетоскопа выше, чем классического. Данная частотная характеристика также обладает существенной неравномерностью.

Следует отметить, что измерение производилось на накладных наушниках, которые не обладают высокой равномерностью частотной характеристики в области от 100 Гц до 10 кГц. При проектировании систем электронной аускультации рекомендуется в качестве источника звуковоспроизведения использовать мониторные наушники, имеющие широкий частотный диапазон и равномерную частотную характеристику с минимальным разбросом от изделия к изделию.

Таким образом, можно контролировать повторяемость характеристик выпускаемых изделий.

Учитывая результаты приведенных выше измерений, в конструкцию головки электронного стетоскопа были внесены изменения. Также была разработана и изготовлена мембрана с контролируемой частотой резонанса. Также в новых экспериментах использованы полноразмерные мониторные наушники, обеспечивающие высокую равномерность частотной характеристики от 100 Гц до 16 кГц. На рисунке 4 изображена ЧХ УЗД измененной конструкции головки электронного стетоскопа, в которой использовалась мембрана из ПЭТ-плёнки толщиной 20 мкм.

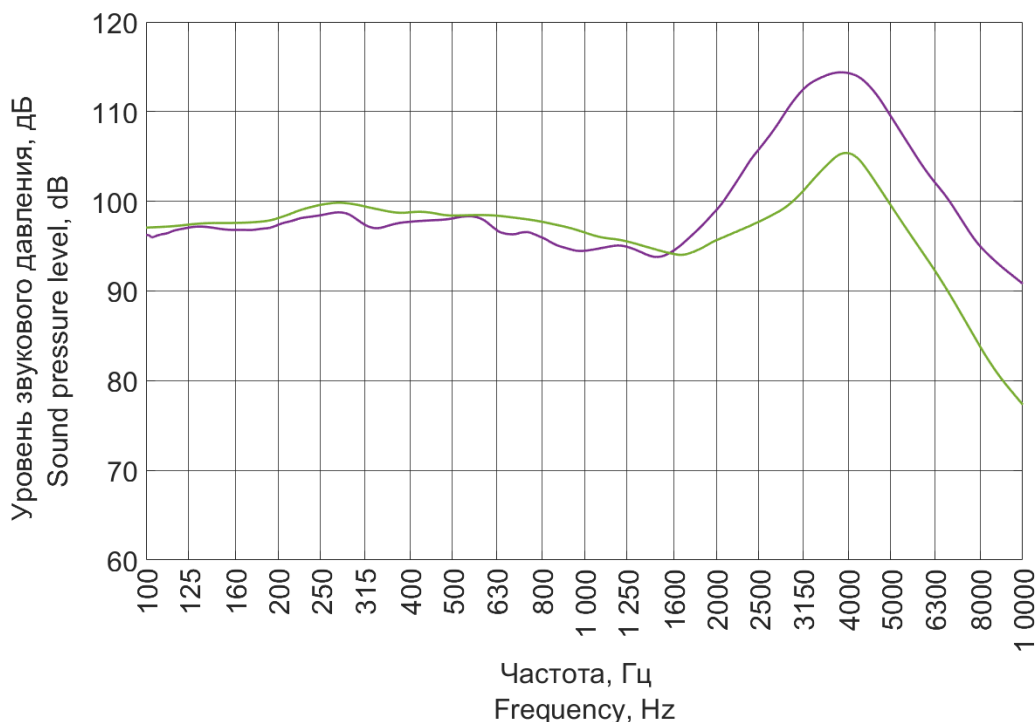


Рис. 4. Частотная характеристика уровня звукового давления измененной конструкции: фиолетовая линия – электронная головка с стетоскопа с натяжением мембраны, соответствующим резонансной частоте 800 Гц; зеленая линия – электронная головка с стетоскопа с натяжением мембраны, соответствующим резонансной частоте 250 Гц

Fig. 4. Frequency response of the modified sound pressure level: violet line – electronic head from a stethoscope with membrane tension corresponding to a resonant frequency of 800 Hz; green line – electronic head from a stethoscope with membrane tension corresponding to a resonant frequency of 250 Hz

На рисунке 4 фиолетовый график ЧХ имеет более высокий уровень резонанса на частоте 4 кГц. При этом для двух ЧХ отсутствуют резкие резонансные пики в диапазоне частот от 100 Гц до 1600 Гц. Частотная характеристика улучшенной конструкции обладает малой неравномерностью по сравнению с классической головкой стетоскопа.

Выводы

Предложен метод измерения параметров ЧХ УЗД классических и электронных стетоскопов. Метод максимально приближен к стандартизирован-

ным методам контроля акустических параметров, при этом обладает достаточной простотой и дешевизной относительно метода измерения по давлению, демонстрируя качественную схожесть результатов измерений.

В ходе экспериментальных исследований продемонстрировано влияние конструкции головки стетоскопа и характеристик мембраны на акустические параметры электронного стетоскопа. Предложены конструкция головки стетоскопа и характеристики мембраны, обеспечивающие минимальную неравномерность АЧХ в рабочем диапазоне

частот. Электронный стетоскоп с мембраной меньшей толщины и мониторными полноразмерными наушниками демонстрирует большую равномерность АЧХ по сравнению с исходной конструк-

цией. Высокая равномерность АЧХ позволяет снизить влияние психоакустического эффекта маскирования звуков, что положительно сказывается на качестве проведения процедуры аускультации.

Список литературы

1. Злобин Д. В. Методика и устройство для измерения амплитудно-частотных характеристик датчиков электронной аускультации // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2012. № 4. С. 110–115.
2. Changes in the breath sound spectrum with bronchodilation in children with asthma / Mariko Nukaga, Hideyuki Tabata, Mayumi Enseki, Kota Hirai, Hiroyuki Furuya, Masahiko Kato, Hiroyuki Mochizuki // Respiratory Investigation. 2018. Vol. 56, is. 5. P. 392–398.
3. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. C. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 3rd ed. New York: Prentice Hall, 1994.
4. Рыбочкин А. Ф., Калугина Н. М. Методы и средства анализа акустических шумов легких человека // Научный вестник. 2016. № 2. С. 50–62.
5. Сафронова М. А., Ширяев А. Д., Коренбаум В. И. Анализ гармоник свистящих звуков в шумах форсированного выдоха человека // Акустический журнал. 2021. Т. 67, № 4. С. 454–464. <https://doi.org/10.31857/S0320791921040122>. EDN LNIKKO
6. Stethoscope acoustics. The doctor and his stethoscope / Ertel Paul Y. [et al.] // Circulation. 1966. N 34(5). P. 889–898.
7. Биомедицинские сигналы и изображения в цифровом здравоохранении: хранение, обработка и анализ / В. С. Кубланов, А. Ю. Долганов, В.Б. Костоусов [и др.]; под ред. В. С. Кубланова. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2020. 240 с.
8. Кубланов В. С., Борисов В. И., Долганов А. Ю. Анализ биомедицинских сигналов в среде MATLAB. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2016. 120 с.
9. Polat H., Güler I. A simple computer-based measurement and analysis system of pulmonary auscultation sounds // Journal of Medical Systems. 2004. N 28(6). P. 665–672. <https://doi.org/10.1023/b:joms.0000044968.45013.ce>. PMID: 15615294.
10. Макалов А. О., Соболенкова В. С., Смирнов В. А. Проблемы и задачи в области электронной аускультации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 6. С. 45–50.
11. Федотов А. А., Акулов С. А. Измерительные преобразователи биомедицинских сигналов систем клинического мониторинга. М.: Радио и связь, 2013. 250 с.
12. Исаков Р. В., Алексеева И. И. Биотехническая система регистрации виброакустических сигналов человека // Биотехносфера. 2017. № 5(53). С. 28–31. EDN YPQFDN.
13. Патент 188636 Российская Федерация, МПК А61В 5/08, А61В 7/04, А61В 7/00. Устройство для преобразования механического стетофонендоскопа в электронный / Малинин С. В., Фурман Е. Г. № 2018134746; заявл. 10.01.18; опубл. 18.04.19.

14. Патент 182368 Российская Федерация, МПК А61В 7/04. Электронный стетоскоп / Усков А. И., Ямпольский И. И. № 2017145290; заявл. 22.12.17; опубл. 15.08.18.
15. Патент 2644546 Российская Федерация, МПК А61В 7/04 (2006.01). Электронный медицинский стетоскоп / Борисов Е. Г., Борисова Л. И., Семенов А. Г. № 2016142823; заявл. 31.10.16; опубл. 12.02.18.
16. Степанов Д. А. Электронный стетоскоп: адаптация концепции под российские социально-экономические реалии // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения: труды X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 19–21 ноября 2015 г.: в 2 ч. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского политехнического университета, 2015. Т. 10, № 1. С. 413–415.
17. Гончарук М. Е. Электронный стетоскоп. Проблемы электронной аускультации // Наука, техника, промышленное производство: история, современное состояние, перспективы: материалы региональной научно-практической конференции студентов и аспирантов, Владивосток, 08–28 декабря 2020 года. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2021. С. 341–344. EDN RPPQLB.
18. Barry Silverman, Michael Balk. Digital Stethoscope – Improved Auscultation at the Bedside // *The American Journal of Cardiology*. 2019. Vol. 123, is. 6. P. 984–985.
19. Angela Troncoso, Juan A. Ortega, Ralf Seepold, Natividad Martínez Madrid. Non-invasive devices for respiratory sound monitoring // *Procedia Computer Science*. 2021. Vol. 192. P. 3040–3048.
20. Lukasz J. Nowak, Karolina M. Nowak. An experimental study on the role and function of the diaphragm in modern acoustic stethoscopes // *Applied Acoustics*. 2019. Vol. 155. P. 24–31.

References

1. Zlobin D. V. Metodika i ustroystvo dlya izmereniya amplitudno-chastotnykh kharakteristik datchikov elektronnoi auskul'tatsii [Methodology and device for measuring the amplitude-frequency characteristics of electronic auscultation sensors]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Izhevsk State Technical University*, 2012, no. 4, pp. 110–115.
2. Mariko Nukaga, Hideyuki Tabata, Mayumi Enseki, Kota Hirai, Hiroyuki Furuya, Masahiko Kato, Hiroyuki Mochizuki. Changes in the sound spectrum of respiration during bronchial dilation in children with asthma. *Respiratory Investigation*, 2018, vol. 56, is. 5, pp. 392–398.
3. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. S. Time series analysis: forecasting and control. 3rd ed. New York, Prentice-Hall Publ., 1994.
4. Rybochkin A. F., Kalugina N. M. Metody i sredstva analiza akusticheskikh шумов legkikh cheloveka [Methods and means of analysis of acoustic noises of human lungs]. *Nauchnyi vestnik = Scientific Bulletin*, 2016, no. 2, pp. 50–62.

5. Safronova M. A., Shiryaev A. D., Korenbaum V. I. Analiz garmonik svistyashchikh zvukov v shumakh forsirovannogo vydokha cheloveka [Analysis of harmonics of whistling sounds in human forced exhalation noises]. *Akusticheskii zhurnal = Acoustic Magazine*, 2021, vol. 67, no. 4, pp. 454–464. <https://doi.org/10.31857/S0320791921040122>. EDN NIKKO
6. Ertel Paul Yu., eds. Acoustics of the stethoscope. The doctor and his stethoscope. *Circulation*, 1966, no. 34(5), pp. 889–898.
7. Kublanov V. S., Dolganov A. Yu., Kostousov V. B., eds. Biomeditsinskie signaly i izobrazheniya v tsifrovom zdravookhranении: khranenie, obrabotka i analiz [Biomedical signals and images in digital healthcare: storage, processing and analysis]; ed. by V. S. Kublanov. Yekaterinburg, Ural University Publ., 2020. 240 p.
8. Kublanov V. S., Borisov V. I., Dolganov A. N. Analiz biomeditsinskikh signalov v srede MATLAB [Analysis of bimetallic metals in MATLAB environment]. Yekaterinburg, Ural University Publ., 2016. 120 p.
9. Polat H., Guler I. A simple computer system for measuring and analyzing sounds during lung auscultation. *Journal of Medical Systems*, 2004, no. 28(6), pp. 665–672. <https://doi.org/10.1023/b:joms.0000044968.45013.ce>. PMID: 15615294
10. Makalov A. O., Sobolenkova V. S., Smirnov V. A. Problemy i zadachi v oblasti elektronnoi auskul'tatsii [Problems and tasks in the field of electronic auscultation]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of Tula State University. Technical Sciences*, 2020, is. 6, pp. 45–50.
11. Fedotov A. A., Akulov S. A. Izmeritel'nye preobrazovateli biomeditsinskikh signalov sistem klinicheskogo monitoringa [Measuring transducers of biomedical signals of clinical monitoring systems]. Moscow, Radio and Communications Publ., 2013. 250 p.
12. Isakov R. V., Alekseeva I. I. Biotehnicheskaya sistema registratsii vibro-akusticheskikh signalov cheloveka [Biotechnical system of registration of vibro-acoustic human signals]. *Biotekhnosfera = Biotechnosphere*, 2017, no. 5(53), pp. 28–31. EDN YPQFDN
13. Malinin S. V., Furman E. G. Ustroistvo dlya preobrazovaniya mekhanicheskogo stetofonendoskopa v elektronnyi [A device for converting a mechanical stethophonendoscope into an electronic one]. Patent RF, no. 188636, 2018.
14. Uskov A. I., Yampolsky I. I. Elektronnyi stetoskop [Electronic stethoscope]. Patent RF, no. 182368, 2017.
15. Borisov E. G., Borisova L. I., Semenov A. G. Elektronnyi meditsinskii stetoskop [Electronic medical stethoscope]. Patent RF, no. 2644546, 2016.
16. Stepanov D. A. [Electronic stethoscope: adaptation of the concept to Russian socioeconomic realities]. *Zdorov'e – osnova chelovecheskogo potentsiala: problemy i puti ikh resheniya. Trudy X Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Sankt-Peterburg, 19–21 noyabrya 2015 g.* [Health – the basis of human potential: problems and ways to solve them. Proceedings of the X All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, St. Petersburg, November 19–21, 2015]. St. Petersburg, St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2015, vol. 10, no. 1, pp. 413–415. (In Russ.)

17. Goncharuk M. E. [Electronic stethoscope. Problems of electronic auscultation]. *Nauka, tekhnika, promyshlennoe proizvodstvo: istoriya, sovremennoe sostoyanie, perspektivy. Materialy regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov i aspirantov, Vladivostok, 08–28 dekabrya 2020 goda* [Science, technology, industrial production: history, modern state, prospects. Materials of the regional scientific and practical conference of students and postgraduates, Vladivostok, December 08–28, 2020]. Vladivostok, Far Eastern Federal University Publ., 2021, pp. 341–344. (In Russ.) EDN RPPQLB
18. Barry Silverman, Michael Balk. Digital stethoscope – improved auscultation at the patient's bedside. *American Journal of Cardiology*, 2019, vol. 123, is. 6, pp. 984–985.
19. Angela Troncoso, Juan A. Ortega, Ralph Sipold, Natividad Martinez Madrid. Non-invasive devices for monitoring the sound of breathing. *Procedia Computer Science*, 2021, vol. 192, pp. 3040–3048.
20. Lukash J. Novak, Karolina M. Novak. An experimental study of the role and function of the diaphragm in modern acoustic stethoscopes. *Applied Acoustics*, 2019, vol. 155, pp. 24–31.

Информация об авторах / Information about the Authors

Макалов Алексей Олегович, аспирант кафедры приборов и биотехнических систем, Институт высокоточных систем им. В. П. Грязева, Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация, e-mail: alex.makalu@outlook.com

Alexey O. Makalov, Post-Graduate Student, of the Department of Devices and Biotechnical Systems, V. P. Gryazev Institute of High-Precision Systems, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: alex.makalu@outlook.com

Смирнов Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры приборов и биотехнических систем, Институт высокоточных систем им. В. П. Грязева, Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация, e-mail: veld071@rambler.ru

Vladimir A. Smirnov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Devices and Biotechnical Systems, V. P. Gryazev Institute of High-Precision Systems, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: veld071@rambler.ru

Прохорцов Алексей Вячеславович, доктор технических наук, доцент кафедры приборов и биотехнических систем, Институт высокоточных систем им. В. П. Грязева, Тульский государственный университет, г. Тула, Russian Federation, e-mail: proxav@rambler.ru

Alexey V. Prokhortsov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Devices and Biotechnical Systems, V. P. Gryazev Institute of High-Precision Systems, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: proxav@rambler.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-137-152>

Система электронной аускультации: обработка аускультативных данных

А. О. Макалов¹, В. А. Смирнов¹, А. В. Прохорцов¹ ✉

¹ Тульский государственный университет
пр-т Ленина, д. 92, г. Тула 300012, Российская Федерация

✉ e-mail: proxav@rambler.ru

Резюме

Цель исследования – повышение разнообразия конструкций систем электронной аускультации с измеренными характеристиками и апробированием. Серия статей включает в себя разработку модели системы электронной аускультации, разработку конструкции электронного стетоскопа, изготовление экспериментального образца, разработку методики измерения амплитудно-частотных характеристик электронных и классических стетоскопов, апробирование предложенных моделей и методов, анализ аускультативных данных. В статье рассмотрены математические методы первичного анализа аускультативных данных. Для эксперимента использованы записи нормального и жесткого дыхания. Произведен частотный, частотно-временной и автокорреляционный анализ дыхательных звуков.

Методы. Исследования базировались на теории цифровой обработки сигналов. В исследовании использованы аускультативные данные, полученные с экспериментального образца системы электронной аускультации. Использовались электронные записи жесткого (паталогического) и нормального дыхания человека над левым средним легким. Дыхательные шумы были преобразованы в цифровую форму со следующими параметрами: частота дискретизации $f_d = 48$ кГц; разрядность $n = 24$ бит; количество каналов 1. Для анализа частотной информативности записей построены их спектры. Для вычисления значений в спектрах использовалось быстрое преобразование Фурье.

Результаты. В представленной работе проанализированы частотные характеристики записей жесткого и нормального дыхания. Получены значения автокорреляционных функций. Получена авторегрессионная модель процесса нормального дыхания. Задача аналитического определения порядка модели остаётся открытой и требует отдельного решения. Полученная модель позволяет генерировать эквивалентный дыхательный шум вдоха или выдоха при подаче на её вход сигнала с равномерным.

Заключение. Апробирован образец системы электронной аускультации, предложены методы упрощенного первичного анализа аускультативных данных. Разница в результатах обработки жесткого и нормального дыхания не имеет статистической значимости ввиду малой выборки.

Ключевые слова: система электронной аускультации; анализ легочных шумов; дыхательные звуки; обработка аускультативных данных; преобразование Фурье; спектрограмма.

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

Для цитирования: Макалов А. О., Смирнов В. А., Прохорцов А. В. Система электронной аускультации: обработка аускультативных данных // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 137–152. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-137-152>.

Поступила в редакцию 17.04.2023

Подписана в печать 10.05.2023

Опубликована 30.06.2023

© Макалов А. О., Смирнов В. А., Прохорцов А. В., 2023

Electronic Auscultation System: Processing of Auscultatory Data

Alexey O. Makalov¹, Vladimir A. Smirnov¹, Alexey V. Prokhortsov¹ ✉

¹ Tula State University
92 Lenin Ave., Tula 300012, Russian Federation

✉ e-mail: proxav@rambler.ru

Abstract

The purpose of research is to increase the diversity of electronic auscultation system designs with measured characteristics and testing. The series of articles includes the development of a model of the electronic auscultation system, the design of an electronic stethoscope, the manufacture of an experimental sample, the development of a methodology for measuring the amplitude-frequency characteristics of electronic and classical stethoscopes, testing of the proposed models and methods, analysis of auscultative data. The article considers mathematical methods of primary analysis of auscultative data. Recordings of normal and hard breathing were used for the experiment. Frequency, time-frequency and autocorrelation analysis of respiratory sounds was performed.

Methods. The research was based on the theory of digital signal processing. The study uses auscultative data obtained from an experimental sample of an electronic auscultation system. Electronic records of hard (pathological) and normal human breathing over the left middle lung were used. Respiratory noises were converted into digital form with the following parameters: sampling frequency $f_d = 48$ kHz; bit depth $n = 24$ bits; number of channels 1. To analyze the frequency information content of the recordings, their spectra were constructed. A fast Fourier transform was used to calculate the values in the spectra.

Results. In the presented work, the frequency characteristics of recordings of hard and normal breathing are analyzed. The values of autocorrelation functions are obtained. An author-regression model of the process of normal breathing is obtained. The problem of analytical determination of the model order remains open and requires a separate solution. The resulting model allows you to generate an equivalent breathing noise of inhalation or exhalation when a signal with a uniform is applied to its input.

Conclusion. A sample of the electronic auscultation system has been tested, methods of simplified primary analysis of auscultative data have been proposed. The difference in the results of the treatment of hard and normal breathing has no statistical significance due to the small sample.

Keywords: electronic auscultation system; analysis of lung sounds; respiratory sounds; processing of auscultatory data; Fourier transform; spectrogram.

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

For citation: Makalov A. O., Smirnov V. A., Prokhortsov A. V. Electronic Auscultation System: Processing of Auscultatory Data. *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(2): 137–152. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-137-152>.

Received 17.04.2023

Accepted 10.05.2023

Published 30.06.2023

Введение

Обработка и анализ сигналов в биомедицинских системах является актуаль-

ной задачей, поскольку для биологических процессов характерна значительная изменчивость и разнообразие признаков [1; 2; 3; 4]. Поиск математических мето-

дов для качественного выявления и количественного и анализа существенных характеристик биомедицинских сигналов является непростой задачей ввиду сложной модели сигнала. Одним из видов таких сигналов являются дыхательные звуки человека. Процесс дыхания человека является квазипериодическим, так как период дыхательного цикла, глубина и другие параметры варьируются. Таким образом, каждый цикл «вдох – выдох» представляет собой реализацию случайного процесса [5; 6; 7; 8].

Статья посвящена экспериментальному исследованию методов обработки данных, полученных при испытаниях разработанной системы электронной аускультации. Предлагаемые для первичного анализа методы просты в при-

менении и с большой вероятностью позволяют выделить в записях дыхательных звуков диагностические признаки.

Материалы и методы

С использованием разработанной системы электронной аускультации [9; 10] получены электронные записи жесткого (паталогического) и нормального дыхания человека над левым средним легким.

Дыхательные шумы были преобразованы в цифровую форму со следующими параметрами:

1. Частота дискретизации $f_d = 48$ кГц.
2. Разрядность $n = 24$ бит.
3. Количество каналов 1.
4. Формат файла WAV.

Для визуального сравнения амплитудных характеристик записей построены временные диаграммы (рис. 1).

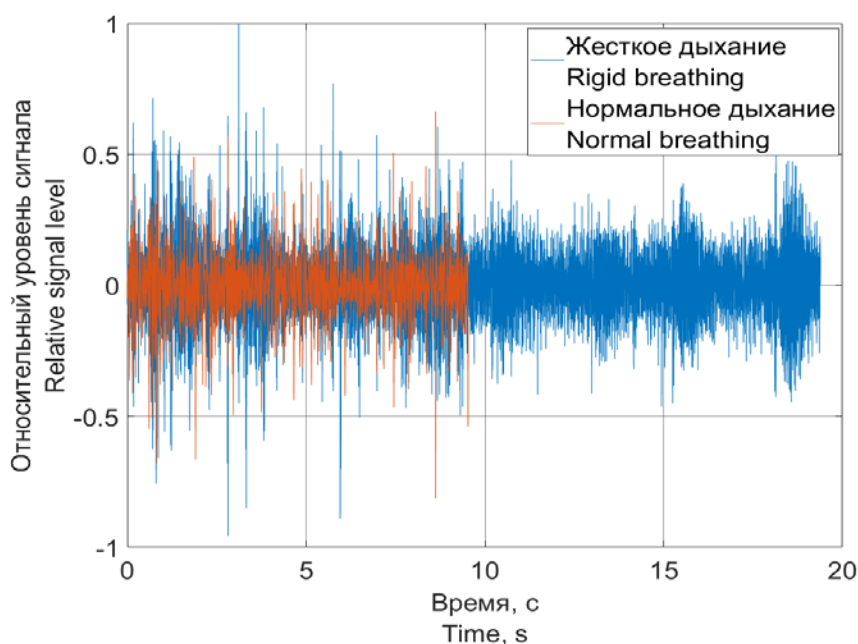


Рис. 1. Временные диаграммы дыхания

Fig. 1. Timing diagrams of breathing

На рисунке 1 видно, что записи имеют различную длительность, при этом относительный уровень сигналов примерно одинаков.

Для анализа частотной информативности записей построены их спектры. Для вычисления значений в спектрах использовалось быстрое преобразование

Фурье (БПФ) [11]. Значения амплитудного спектра БПФ получены по следующей формуле:

$$S(f) = 20 \lg (|FFT(f)|), \quad (1),$$

где $FFT(f)$ – значение комплексной амплитуды БПФ на частоте f ;

$S(f)$ – k -е значение логарифмической оценки амплитуды БПФ на частоте f .

Шаг значений по частоте является дискретным и определяется следующей формулой:

$$\Delta f = \frac{f_d}{N_{\text{отс}}}, \quad (2)$$

где $f_d = 48000$ Гц – частота дискретизации; $N_{\text{отс}}$ – количество отсчётов записи.

Длина записей в отчетах для записей жесткого и дыхания составляет $N_{\text{отс. жестк}} = 930344$ и $N_{\text{отс. норм}} = 457764$ соответственно. Тогда разрешение по частоте для амплитудных спектров жесткого дыхания и дыхания в норме по формуле (2) составляет:

$$\Delta f_{\text{жестк}} = 0,052 \text{ Гц},$$

$$\Delta f_{\text{норм}} = 0,105 \text{ Гц}.$$

На рисунке 3 представлен амплитудный спектр БПФ.

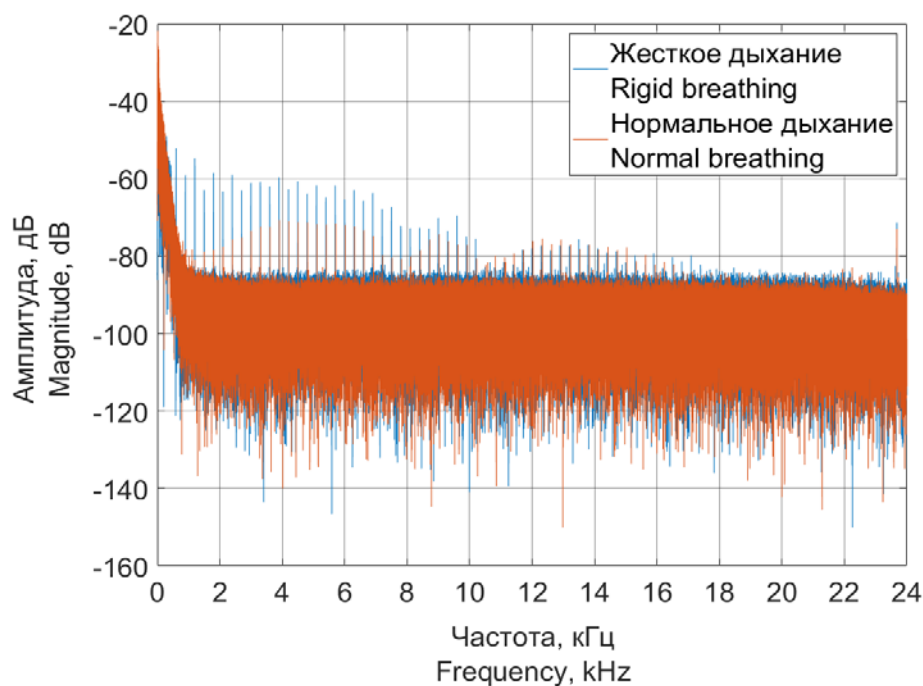


Рис. 2. Амплитудный спектр БПФ

Fig. 2. FFT amplitude spectrum

Анализ информации (рис. 2) позволяет утверждать, что наибольшая информация о сигнале в частотной области расположена на частоте до 2 кГц. Также на графике спектра видна широкополос-

ная помеха, которая представлена узкими амплитудными пиками до частоты 18 кГц. Такая помеха может представлять прямоугольные импульсы, которые произведены в процессе работы цифровой части прибора.

Для получения большей информации о сигналах в частотно-временной области построены спектрограммы. Спектрограмма представляет собой логарифм амплитуды оконного преобразования Фурье [11]:

$$SP(f, t) = 20 \lg(|STFT(f, t)|), \quad (3)$$

где $STFT(f, t)$ – значение комплексной амплитуды оконного преобразования Фурье в момент времени t на частоте f ; $SP(f, t)$ – значение логарифмической оценки амплитуды оконного преобразования Фурье в момент времени t на частоте f .

Шаг сетки времени для результата оконного преобразования Фурье является дискретным и определяется длиной окна и коэффициентом перекрытия:

$$\Delta t_{\text{ОПФ}} = t_0 - k \cdot t_0, \quad (4)$$

где $\Delta t_{\text{ОПФ}}$ – шаг отсчётов по времени оконного преобразования Фурье; t_0 – длина окна в единицах времени; $k = 0 \dots 0,99$ – коэффициент перекрытия.

Размер окна определяет соотношение разрешающей способности по времени и по частоте. Меньший размер окна позволяет получить большее разрешение по времени, больший размер окна позволяет получить большее разрешение по частоте. Для наилучшего выделения патологических дыхательных звуков, таких как хрипы и свисты, размер

окна должен быть сопоставим с длительностью этих компонент в сигнале. В [12; 13; 14; 15] показано, что длительность сухих хрипов превышает 100 мс, а длительность тресков в легких составляет менее 100 мс. Принято решение определить длину окна по времени равной 100 мс. Для частоты дискретизации 48 кГц это значение будет равно 4800 отсчётам. Для плавного перехода между участками принято решение определить коэффициент перекрытия окон равным 0,5.

На спектре сигналов (рис. 2) амплитудные компоненты ниже уровня –80 дБ не несут информации. На основе этого принято решение задать нижний порог построения спектрограммы –80 дБ. Таким образом, все результирующие значения амплитуды оконного преобразования Фурье ниже уровня –80 дБ будут приравнены к данному значению. Такая операция произведена для повышения контрастности изображения.

Построены спектрограммы легочных звуков из исходного набора данных (рис. 4 и 5) со следующими параметрами:

1. Тип окна – прямоугольное.
2. Длина окна по времени $t_0 = 100$ мс.
3. Коэффициент перекрытия $k = 50\%$.
4. Шаг значений по времени $\Delta t_{\text{ОПФ}} = 50$ мс.
5. Нижний порог чувствительности $SP_{\text{пор}} = -90$ дБ.
6. Шаг сетки частот $\Delta f = 10$ Гц.

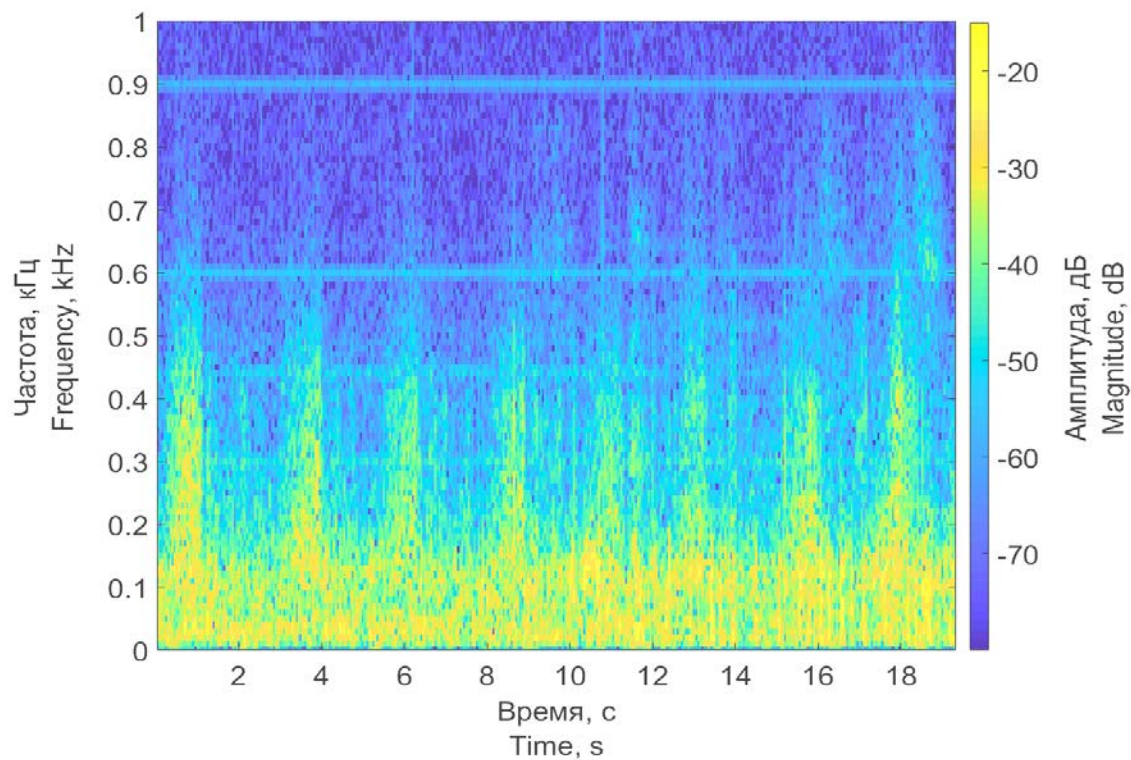


Рис. 3. Спектрограмма записи жесткого дыхания

Fig. 3. Spectrogram of hard breathing recording

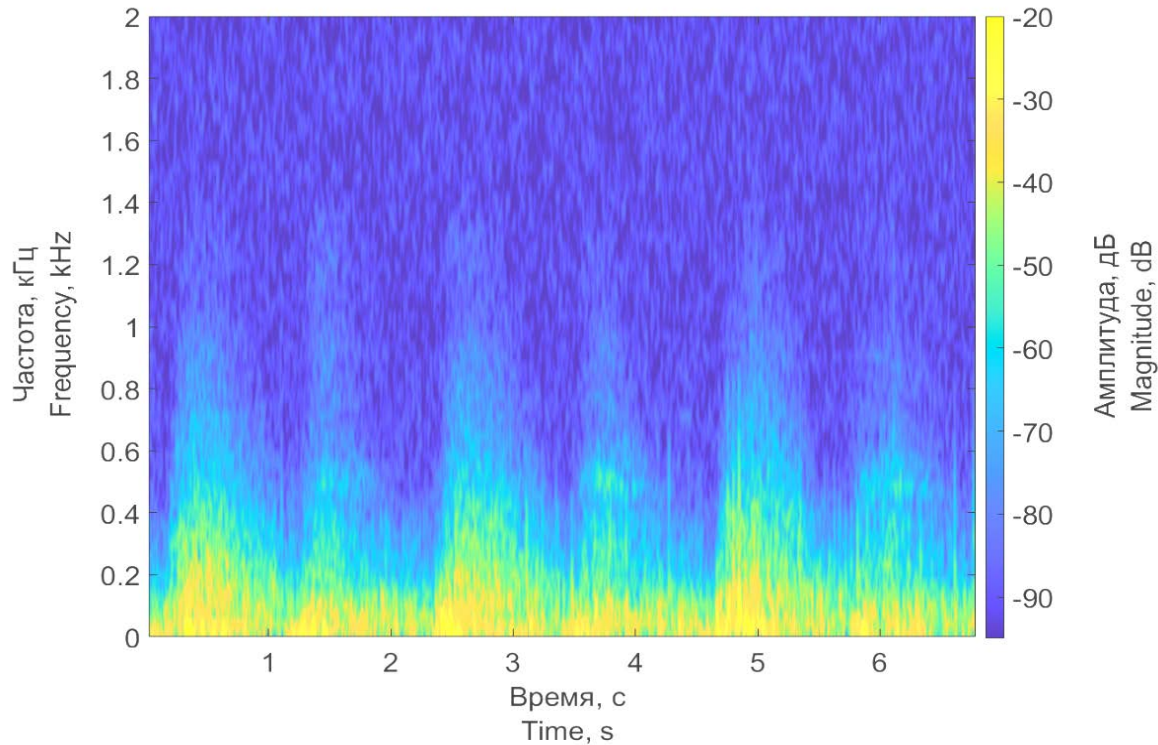


Рис. 4. Спектрограмма записи нормального дыхания

Fig. 4. Spectrogram recording of normal respiration

На рисунках 3 и 4 видны дыхательные циклы. При этом частота цикла дыхания на записи с нормальным дыханием выше, чем на записи с жестким дыханием. Также на спектрограмме жесткого дыхания практически не видны фазы выдоха, что позволяет выдвинуть гипотезу о наличии некоторой патологии.

Записи, используемые для анализа в данной работе, разбиты на отдельные фрагменты, содержащие одну дыхательную фазу. Получено 4 фрагмента записей с фазами вдоха и выдоха для жесткого и нормального дыхания. Минимальная длина фрагмента в отсчётах составляла

$$N_{\text{отс. фраг min}} = 88224 \text{ отсчёта.}$$

Фрагмент максимальной длины содержит

$$N_{\text{отс. фраг max}} = 137905 \text{ отсчёта.}$$

Таким образом при частоте дискретизации 48 кГц длина фрагментов лежит в диапазоне

$$t_{\text{ф}} = 1,84 \dots 2,87 \text{ с.}$$

Дальнейший анализ будет произведен для полученных фрагментов.

Для графического анализа частотных характеристик фрагментов циклов дыхания использован амплитудный спектр БПФ. Разрешающая способность спектра по частоте, определённая по формуле (2) для значений $N_{\text{отс. фраг min}}$ и $N_{\text{отс. фраг max}}$, расположена в диапазоне

$$\Delta f = 0,35 \dots 0,54 \text{ Гц.}$$

Для сглаживания спектров использовано скользящее среднее с размером окна в 50 отсчётов. Амплитудные спектры для фрагментов дыхания представлены на рисунке 5.

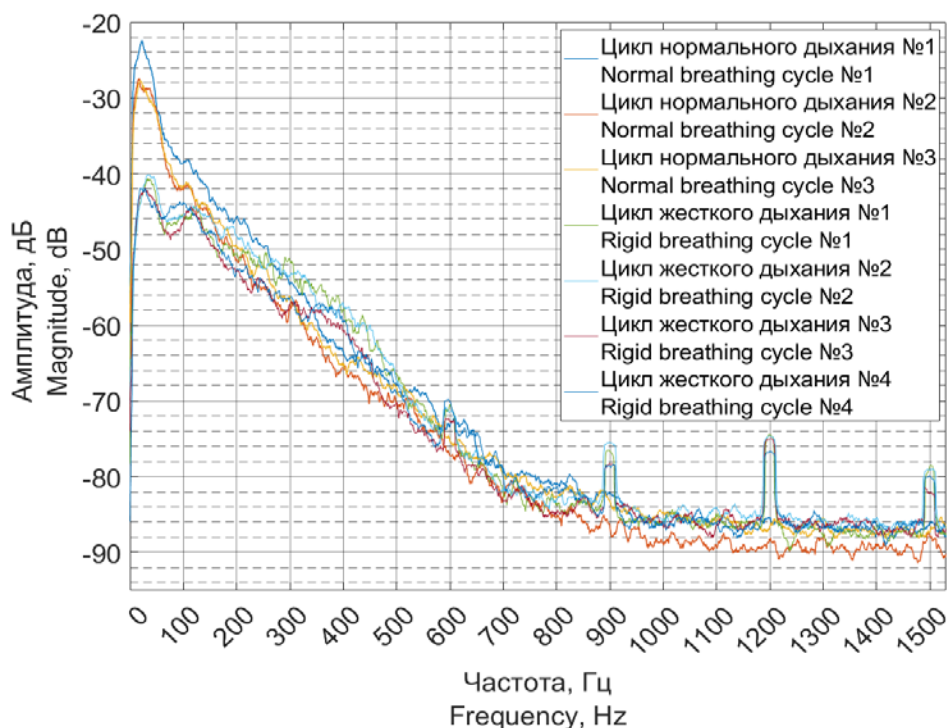


Рис. 5. Амплитудный спектр БПФ циклов жесткого и нормального дыхания. Цикл нормального дыхания № 4 не отображен

Fig. 5. FFT amplitude spectrum of hard and normal breathing cycles. Normal breathing cycle № 4 is not displayed

Цикл нормального дыхания № 4 имеет значительное отклонение от остальных циклов нормального дыхания по амплитуде в диапазоне частот от 200 Гц до 400 Гц. Данный цикл исключён из дальнейшего анализа.

Сглаженные спектры циклов жесткого дыхания и циклов нормального дыхания усреднены для сравнения амплитудно-частотных характеристик данных видов дыхания. Усредненные спектры циклов жесткого и нормального дыхания представлены ниже (рис. 6).

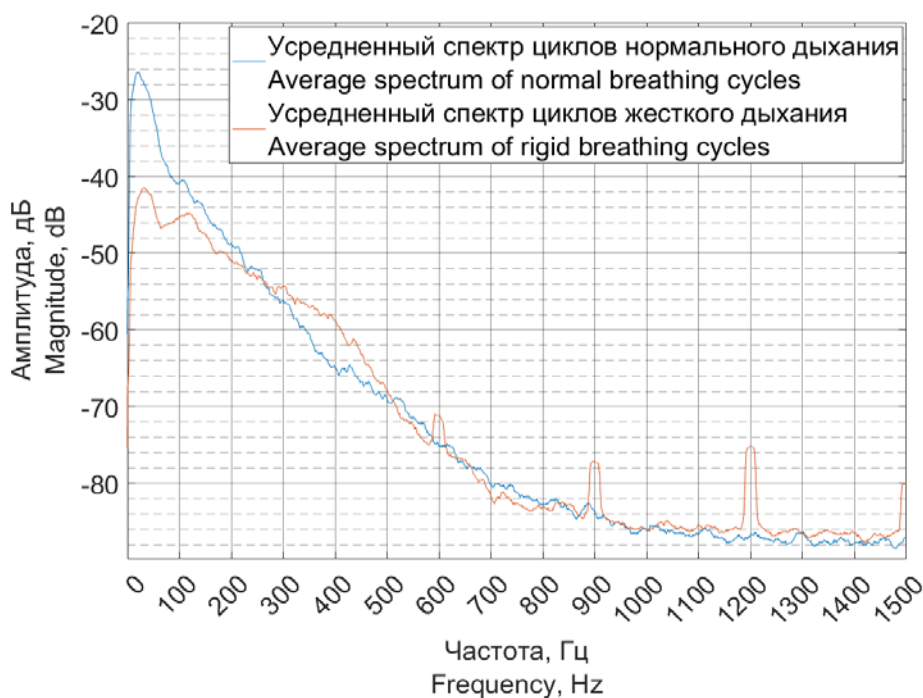


Рис. 6. Сравнение спектров циклов жесткого и нормального дыхания

Fig. 6. Comparison of the spectra of hard and normal breathing cycles

На рисунке 6 видно, что усредненный спектр нормального дыхания на частоте 20 Гц имеет амплитуду на 15 дБ выше, чем усредненный спектр жесткого дыхания на данной частоте. При этом спектр жесткого дыхания имеет амплитуду на 6 дБ больше, чем спектр нормального дыхания, что может являться основным отличающим критерием данных видов дыхания. В исследованиях [16; 17; 18; 19] получены аналогичные результаты.

Для статистического анализа сигналов используется автокорреляционная

функция (АКФ) [20], которая отображает зависимость между сигналом и его сдвинутой копией от величины временного сдвига. АКФ используется для определения повторяющихся последовательностей в наборе данных. Для визуального анализа повторяющихся последовательностей в фрагментах жесткого и нормального дыхания построены графики АКФ для 2000 шагов сдвига, что соответствует сдвигу на 42 мс с шагом 21 мкс. Значения автокорреляционной функции вычисляются для каждого шага по следующей формуле [20]:

$$r_k = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{D(x)} \cdot \sum_{i=k+1}^N ((x_i - \bar{x})(x_{i-k} - \bar{x})), \quad (5)$$

где r_k – значение АКФ для сдвига на k отсчетов; k – шаг АКФ; N – количество отсчётов временной последовательности x ; x_i – i -й отсчёт временной последовательности; \bar{x} – математическое

ожидание временной последовательности; $D(x)$ – несмещенная оценка дисперсии последовательности x .

Рассмотрим коррелограммы для каждого цикла нормального и жесткого дыхания (рис. 7 и 8).

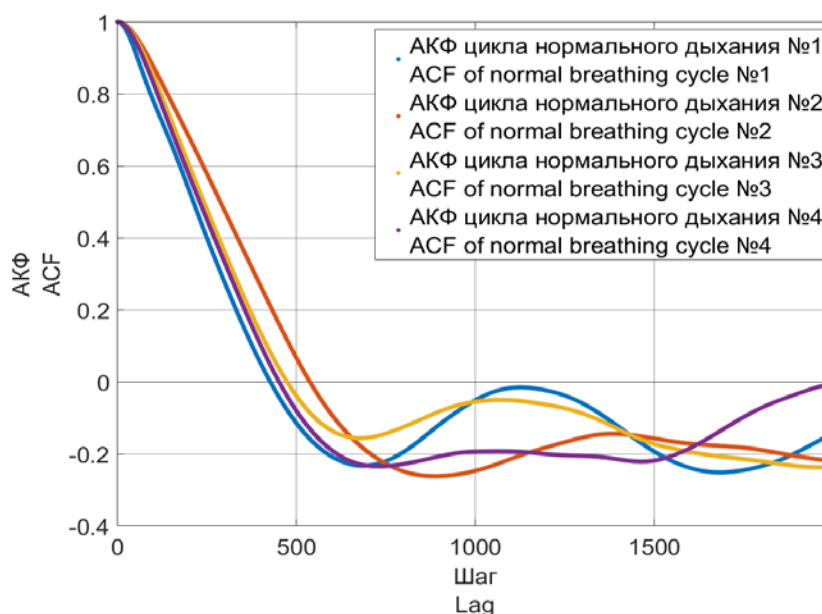


Рис. 7. Коррелограмма циклов нормального дыхания

Fig. 7. Correlogram of normal breathing cycles

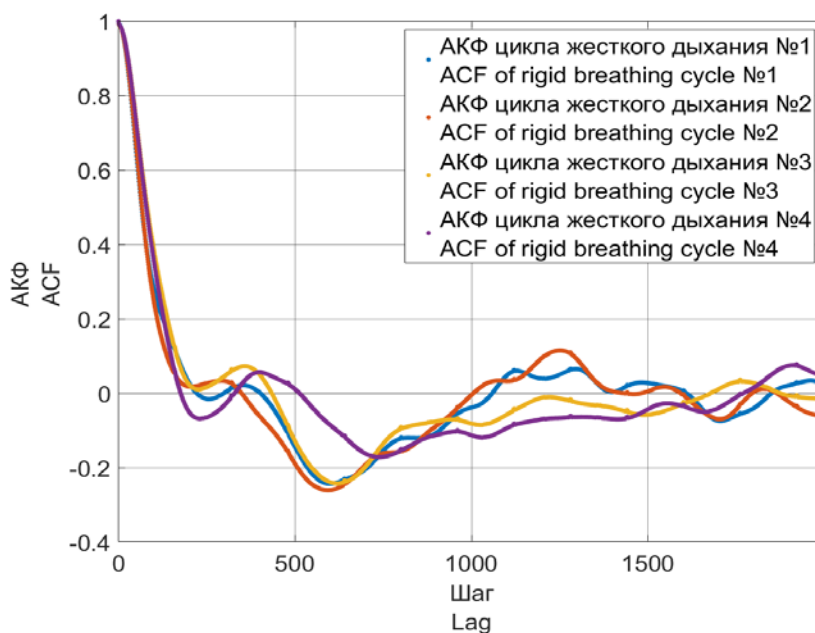


Рис. 8. Коррелограмма циклов жесткого дыхания

Fig. 8. Correlogram of hard breathing cycles

Коррелограммы для циклов нормального дыхания (рис. 8) имеют более плавный характер, меньшее количество экстремумов, а значение АКФ достигает

нуля при шаге более 400 отсчетов (8,3 мс), тогда как АКФ для циклов жесткого дыхания (рис. 9) достигает нуля при шаге в 200 отсчетов (4,2 мс).

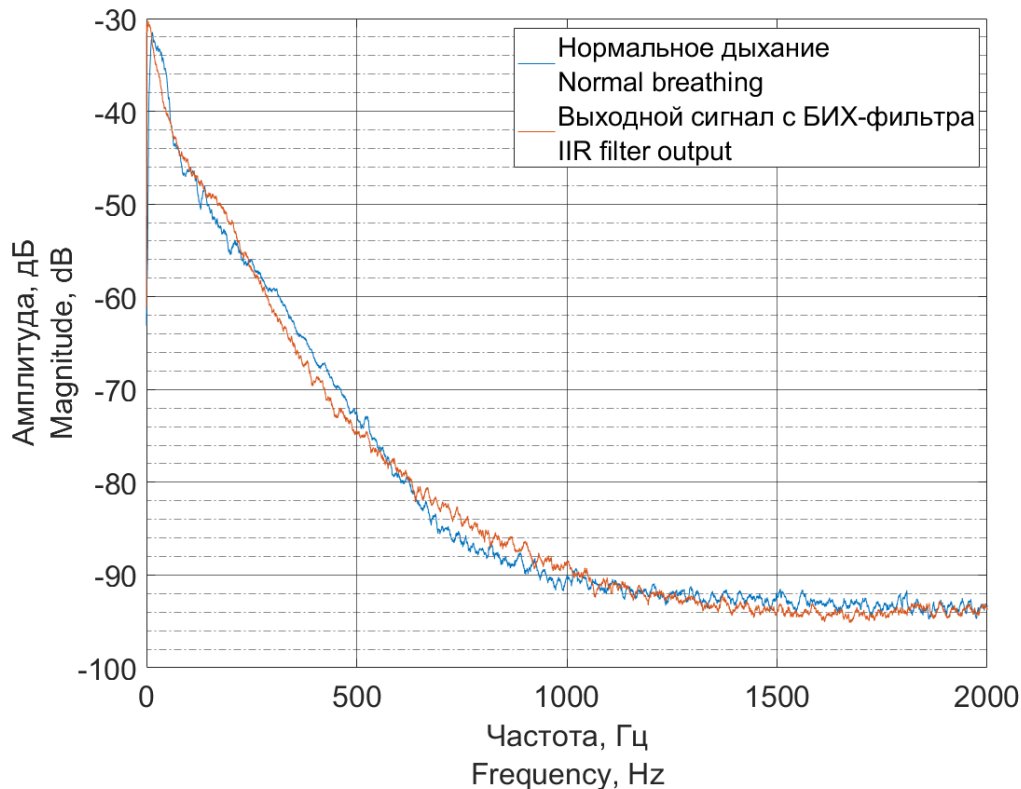


Рис. 9. Сравнение спектра нормального дыхания и спектра сигнала на выходе фильтра

Fig. 9. Comparison of the spectrum of normal breathing and the signal spectrum at the filter output

Таким образом, характер АКФ сигнала может являться важной характеристикой для различения нормального и жесткого дыхания, однако это предположение требует проверки на большем объеме аускультативных данных.

Для построения модели дыхательных использована авторегрессионная модель. Авторегрессионные модели используются для повышения точности оценки спектральной плотности мощности (СПМ) случайных процессов, а также для прогнозирования последую-

щих числовых значений. Авторегрессионный процесс определяется по следующей формуле [11]:

$$x[n] = \sum_{k=1}^P (a[k] \cdot x[n-k]) + u[n], \quad (6)$$

где $x[n]$ – отсчеты выходного сигнала; $a[k]$ – коэффициенты авторегрессии; $P = 45$ – порядок авторегрессионной модели; $u[n]$ – отсчеты возбуждающего процесса.

В качестве возбуждающего процесса в авторегрессионных моделях в статистическом анализе предполагается белый шум с дисперсией D .

Коэффициенты авторегрессионной модели и дисперсия возбуждающего шума получены по методу Юла-Уокера с использованием программного пакета MATLAB.

Порядок модели подобран эмпирически и равен 45. Коэффициенты авторегрессионной модели приведены в таблице.

Таблица. Коэффициенты авторегрессионной модели

Table. Coefficients of the autoregressive model

№	Значение	№	Значение	№	Значение	№	Значение
1	−0,3483	12	0,0087	24	0,0277	35	0,0029
2	−0,1398	13	$2,7 \cdot 10^{-4}$	25	0,0219	36	0,0028
3	−0,2044	14	0,0101	26	0,0237	37	0,0042
4	−0,1152	15	0,0113	27	0,0217	38	0,0060
5	−0,1285	16	0,0188	28	0,0192	39	0,0031
6	−0,0801	17	0,0223	29	0,0165	40	0,0105
7	−0,1002	18	0,0260	30	0,0146	41	0,0099
8	−0,0500	19	0,0252	31	0,0107	42	0,0102
9	−0,0641	20	0,0253	32	0,0139	43	0,0277
10	−0,0327	22	0,0261	33	0,0048	44	0,0219
11	−0,0266	23	0,0232	34	0,0063	45	0,0237

Полученная модель может быть представлена БИХ-фильтром, передаточная функция которого описывается следующим уравнением:

$$H(z) = \frac{\sqrt{D}}{1 + \sum_{k=1}^P (a_k \cdot z^{-k})}, \quad (5)$$

где $D = 58,4 \cdot 10^{-6}$ – дисперсия белого шума авторегрессионного процесса; a_k – коэффициенты авторегрессии (см. табл.); $P = 45$ – порядок авторегрессионной модели.

При подаче белого шума с дисперсией $D_{\text{ш}} = 1$ на вход цифрового фильтра, описанного передаточной функцией формулы (7), будет получен стационарный сигнал с спектральной плотностью мощности, равной спектральной плотности мощности нормального дыхания.

Так как функция спектральной плотности мощности определяется квадратом модуля преобразования Фурье, то модули преобразования Фурье, сгенерированного с помощью фильтра сигнала и дыхательного сигнала, будут также равны.

На рисунке 9 представлен график сравнения спектров сигнала нормального дыхания и сигнала на выходе модели.

Таким образом, получена стационарная модель процесса нормального дыхания. Задача аналитического определения порядка модели остаётся открытой и требует отдельного решения. Полученная модель позволяет генерировать эквивалентный дыхательный шум

вдоха или выдоха при подаче на её вход сигнала с равномерным.

Результаты и их обсуждение

Полученные результаты в ходе анализа нельзя называть статистически значимыми, так как не проводилось целенаправленного исследования и количество записей не позволяет использовать параметрические критерии оценки достоверности результатов. Данная статья предлагает только алгоритмы для первичного визуального (качественного) анализа аускультативных данных.

В дальнейшем требуется провести серию контролируемых экспериментов записи дыхания над различными областями легких у нескольких испытуемых, для которых определены качественные характеристики параметров дыхания. Анализ полученных экспериментальных данных позволит подтвердить или опровергнуть эффективность предложенных в данной статье методов.

Выводы

В представленной работе проанализированы частотные характеристики записей жесткого и нормального дыхания. Во временной области данные характеристики обладают незначительными качественными различиями.

Получены значения автокорреляционных функций. В ходе анализа АКФ циклов жесткого и нормального дыхания определены хорошо заметные количественные и качественные различия. Вопрос дальнейшего применения АКФ для различения нормального и патологического дыхания требует дальнейшей проработки.

Получена авторегрессионная модель процесса нормального дыхания. Преимущество данной модели заключается в генерации стационарного сигнала, который обладает спектральными характеристиками, близкими к нормальному дыханию.

Список литературы

1. Федотов А. А., Акулов С. А. Измерительные преобразователи биомедицинских сигналов систем клинического мониторинга. М.: Радио и связь, 2013. 250 с.
2. Злобин Д. В. Методика и устройство для измерения амплитудно-частотных характеристик датчиков электронной аускультации // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2012. № 4. С. 110–115.
3. Рыбочкин А. Ф., Калугина Н. М. Методы и средства анализа акустических шумов легких человека // Научный вестник. 2016. № 2. С. 50–62.
4. Макалов А. О., Соболенкова В. С., Смирнов В. А. Проблемы и задачи в области электронной аускультации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 6. С. 45–50.
5. Биомедицинские сигналы и изображения в цифровом здравоохранении: хранение, обработка и анализ / В. С. Кубланов, А. Ю. Долганов, В.Б. Костоусов [и др.]; под ред. В. С. Кубланова. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2020. 240 с.

6. Сафронова М. А., Ширяев А. Д., Коренбаум В. И. Анализ гармоник свистящих звуков в шумах форсированного выдоха человека // *Акустический журнал*. 2021. Т. 67, № 4. С. 454–464. <https://doi.org/10.31857/S0320791921040122>. EDN LNIKKO
7. Stethoscope acoustics. The doctor and his stethoscope / Ertel Paul Y. [et al.] // *Circulation*. 1966. N 34(5). P. 889–898.
8. Исаков Р. В., Алексеева И. И. Биотехническая система регистрации виброакустических сигналов человека // *Биотехносфера*. 2017. № 5(53). С. 28–31. EDN YPQFDN
9. Патент 182368 Российская Федерация, МПК А61В 7/04. Электронный стетоскоп / Усков А. И., Ямпольский И. И. № 2017145290; заявл. 22.12.17; опубл. 15.08.18.
10. Патент 2644546 Российская Федерация, МПК А61В 7/04 (2006.01). Электронный медицинский стетоскоп / Борисов Е. Г., Борисова Л. И., Семенов А. Г. № 2016142823; заявл. 31.10.16; опубл. 12.02.18.
11. Кубланов В. С., Борисов В. И., Долганов А. Ю. Анализ биомедицинских сигналов в среде MATLAB. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2016. 120 с.
12. Polat H., Güler I. A simple computer-based measurement and analysis system of pulmonary auscultation sounds // *Journal of Medical Systems*. 2004. № 28(6). P. 665–672. <https://doi.org/10.1023/b:joms.0000044968.45013.ce>. PMID: 15615294.
13. Nowak L. J., Nowak K. M. An experimental study on the role and function of the diaphragm in modern acoustic stethoscopes // *Applied Acoustics*. 2019. Vol. 155. P. 24–31.
14. Silverman B., Balk M. Digital Stethoscope – Improved Auscultation at the Bedside // *The American Journal of Cardiology*. 2019. Vol. 123, is. 6. P. 984–985.
15. Патент 188636 Российская Федерация, МПК А61В 5/08, А61В 7/04, А61В 7/00. Устройство для преобразования механического стетофонендоскопа в электронный / Малинин С. В., Фурман Е. Г. № 2018134746; заявл. 10.01.18; опубл. 18.04.19.
16. Changes in the breath sound spectrum with bronchodilation in children with asthma / Mariko Nukaga, Hideyuki Tabata, Mayumi Enseki, Kota Hirai, Hiroyuki Furuya, Masahiko Kato, Hiroyuki Mochizuki // *Respiratory Investigation*. 2018. Vol. 56, is. 5. P. 392–398.
17. Non-invasive devices for respiratory sound monitoring / A. Troncoso, J. A. Ortega, R. Seepold, N. M. Madrid // *Procedia Computer Science*. 2021. Vol. 192. P. 3040–3048.
18. Степанов Д. А. Электронный стетоскоп: адаптация концепции под российские социально-экономические реалии // *Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения: труды X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 19–21 ноября 2015 г.: в 2 ч.* СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского политехнического университета, 2015. Т. 10, № 1. С. 413–415.
19. Гончарук М. Е. Электронный стетоскоп. Проблемы электронной аускультации // *Наука, техника, промышленное производство: история, современное состояние, перспективы: материалы Региональной научно-практической конференции студентов и*

аспирантов, Владивосток, 08–28 декабря 2020 года. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2021. С. 341–344. EDN RPPQLB.

20. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. C. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 3rd ed. New York: Prentice Hall, 1994.

References

1. Fedotov A. A., Akulov S. A. Izmeritel'nye preobrazovateli biomeditsin-skikh signalov sistem klinicheskogo monitoringa [Measuring transducers of biomedical signals of clinical monitoring systems]. Moscow, Radio and Communications Publ., 2013. 250 p.

2. Zlobin D. V. Metodika i ustroistvo dlya izmereniya amplitudno-chastotnykh kharakteristik datchikov elektronnoi auskul'tatsii [Methodology and device for measuring the amplitude-frequency characteristics of electronic auscultation sensors]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Izhevsk State Technical University*, 2012, no. 4, pp. 110–115.

3. Rybochkin A. F., Kalugina N. M. Metody i sredstva analiza akusticheskikh шумов legkikh cheloveka [Methods and means of analysis of acoustic noises of human lungs]. *Nauchnyi vestnik = Scientific Bulletin*, 2016, no. 2, pp. 50–62.

4. Makalov A. O., Sobolenkova V. S., Smirnov V. A. Problemy i zadachi v oblasti elektronnoi auskul'tatsii [Problems and tasks in the field of electronic auscultation]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of Tula State University. Technical Sciences*, 2020, is. 6, pp. 45–50.

5. Kublanov V. S., Dolganov A. Yu., Kostousov V. B., eds. Biomeditsinskie signaly i izobrazheniya v tsifrovom zdravookhranении: khranenie, obrabotka i analiz [Biomedical signals and images in digital healthcare: storage, processing and analysis]; ed. by V. S. Kublanov. Yekaterinburg, Ural University Publ., 2020. 240 p.

6. Safronova M. A., Shiryayev A. D., Korenbaum V. I. Analiz garmonik svistyashchikh zvukov v шумakh forsirovannogo vydokha cheloveka [Analysis of harmonics of whistling sounds in human forced exhalation noises]. *Akusticheskii zhurnal = Acoustic Magazine*, 2021, vol. 67, no. 4, pp. 454–464. <https://doi.org/10.31857/S0320791921040122>. EDN NIKKO

7. Ertel Paul Yu., eds. Acoustics of the stethoscope. The doctor and his stethoscope. *Circulation*, 1966, no. 34(5), pp. 889–898.

8. Isakov R. V., Alekseeva I. I. Biotekhnikeskaya sistema registratsii vibro-akusticheskikh signalov cheloveka [Biotechnical system of registration of vibro-acoustic human signals]. *Biotekhnosfera = Biotechnosphere*, 2017, no. 5(53), pp. 28–31. EDN YPQFDN

9. Uskov A. I., Yampolsky I. I. Elektronnyi stetoskop [Electronic stethoscope]. Patent RF, no. 182368, 2017.

10. Borisov E. G., Borisova L. I., Semenov A. G. Elektronnyi meditsinskii stetoskop [Electronic medical stethoscope]. Patent RF, no. 2644546, 2016.

11. Kublanov V. S., Borisov V. I., Dolganov A. N. Analiz biomeditsinskih signalov v srede MATLAB [Analysis of bimetallic metals in MATLAB environment]. Yekaterinburg, Ural University Publ., 2016. 120 p.
12. Polat H., Guler I. A simple computer system for measuring and analyzing sounds during lung auscultation. *Journal of Medical Systems*, 2004, no. 28(6), pp. 665–672. <https://doi.org/10.1023/b:joms.0000044968.45013.ce>. PMID: 15615294
13. Novak L. J., Novak K. M. An experimental study of the role and function of the diaphragm in modern acoustic stethoscopes. *Applied Acoustics*, 2019, vol. 155, pp. 24–31.
14. Silverman B., Balk M. Digital stethoscope – improved auscultation at the patient's bedside. *American Journal of Cardiology*, 2019, vol. 123, is. 6, pp. 984–985.
15. Malinin S. V., Furman E. G. Ustroistvo dlya preobrazovaniya mekhanicheskogo stetofofonendoskopa v elektronnyi [A device for converting a mechanical stethophonendoscope into an electronic one]. Patent RF, no. 188636, 2018.
16. Mariko Nukaga, Hideyuki Tabata, Mayumi Enseki, Kota Hirai, Hiroyuki Furuya, Masahiko Kato, Hiroyuki Mochizuki. Changes in the sound spectrum of respiration during bronchial dilation in children with asthma. *Respiratory Investigation*, 2018, vol. 56, is. 5, pp. 392–398.
17. Troncoso A., Ortega J. A., Sipold R., Madrid N. M. Non-invasive devices for monitoring the sound of breathing. *Procedia Computer Science*, 2021, vol. 192, pp. 3040–3048.
18. Stepanov D. A. [Electronic stethoscope: adaptation of the concept to Russian socioeconomic realities]. *Zdorov'e – osnova chelovecheskogo potentsiala: problemy i puti ikh resheniya. Trudy X Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Sankt-Peterburg, 19–21 noyabrya 2015 g.* [Health – the basis of human potential: problems and ways to solve them. Proceedings of the X All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, St. Petersburg, November 19–21, 2015]. St. Petersburg, St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2015, vol. 10, no. 1, pp. 413–415. (In Russ.)
19. Goncharuk M. E. [Electronic stethoscope. Problems of electronic auscultation]. *Nauka, tekhnika, promyshlennoe proizvodstvo: istoriya, sovremennoe sostoyanie, perspektivy. Materialy regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov i aspirantov, Vladivostok, 08–28 dekabrya 2020 goda* [Science, technology, industrial production: history, modern state, prospects. Materials of the regional scientific and practical conference of students and postgraduates, Vladivostok, December 08–28, 2020]. Vladivostok, Far Eastern Federal University Publ., 2021, pp. 341–344. (In Russ.) EDN RPPQLB
20. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. S. Time series analysis: forecasting and control. 3rd ed. New York, Prentice-Hall Publ., 1994.

Информация об авторах / Information about the Authors

Макалов Алексей Олегович, аспирант кафедры приборов и биотехнических систем, Институт высокоточных систем им. В. П. Грязева, Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация, e-mail: alex.makalu@outlook.com

Alexey O. Makalov, Post-Graduate Student of the Department of Devices and Biotechnical Systems, V. P. Gryazev Institute of High-Precision Systems, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: alex.makalu@outlook.com

Смирнов Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры приборов и биотехнических систем, Институт высокоточных систем им. В. П. Грязева, Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация, e-mail: veld071@rambler.ru

Vladimir A. Smirnov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Devices and Biotechnical Systems, V. P. Gryazev Institute of High-Precision Systems, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: veld071@rambler.ru

Прохорцов Алексей Вячеславович, доктор технических наук, доцент кафедры приборов и биотехнических систем, Институт высокоточных систем им. В. П. Грязева, Тульский государственный университет, г. Тула, Russian Federation, e-mail: proxav@rambler.ru

Alexey V. Prokhortsov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Devices and Biotechnical Systems, V. P. Gryazev Institute of High-Precision Systems, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: proxav@rambler.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-153-169>

Математическая модель обработки мультиспектральных данных для мобильной платформы экологического мониторинга

С. В. Спевакова¹, А. Г. Спеваков¹ ✉, И. В. Чернецкая¹

¹ Юго-Западный государственный университет

ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: aspev@yandex.ru

Резюме

Целью исследования является математическое обоснование процесса обработки мультиспектральных данных с целью обнаружения локальных зон загрязнения окружающей среды с возможностью классификации загрязняющего вещества.

Методы. В качестве базового математического аппарата используются основы прикладной теории стохастических систем, основанной на уравнениях для многомерных характеристических функций и функционалов. При определении загрязняющего вещества используется критерий, отражающий способность предметов и подчиняющийся закону Ламберта. Для решения задачи классификации объектов применены подходы с использованием бинарной логистической регрессии. При оценке результатов исследования применены статистические методы анализа.

Результаты. Полученные частные математические модели позволяют учесть множество факторов, воздействующих на мобильные платформы экологического мониторинга и функционирующих в автоматическом режиме. Обосновывают возможность дистанционного анализа локальных зон загрязнения окружающей среды с возможностью определения загрязняющих веществ, таких как углеводороды, фосфат-ионы и др., а также поиска несанкционированных локаций строительного и бытового мусора. Повышают точностные характеристики в 1,3 раза при определении параметров выделенных объектов за счет обработки данных, полученных в различных спектральных диапазонах. Способствуют снижению вычислительной сложности алгоритма классификации в 1,1 раза с учетом объема входных данных в ограниченном спектральном диапазоне и уменьшению разрешения эталонного объекта, при этом не влияющего на точность классификации.

Заключение. Разработана математическая модель обработки данных и изображений, полученных в нескольких спектральных диапазонах, при функционировании мультиспектрального устройства для автономной мобильной платформы экологического мониторинга, позволяющая выделять объекты в поле зрения устройства с подвижной платформы, получать детализированное изображение объектов рабочей сцены с пространственной привязкой относительно используемой системы координат, отличительной особенностью которой является повышение точности вычисления координат локальных зон загрязнений и повышение достоверности классификации объектов исходя из характеристики диффузионной отражательной способности в различных спектральных диапазонах.

Ключевые слова: математическая модель; мобильные платформы; экологический мониторинг; классификация загрязняющих веществ.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания Минобрнауки РФ (проект № 0851-2020-0032).

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

Для цитирования: Спевакова С. В., Спевakov А. Г., Чернецкая И. В. Математическая модель обработки мультиспектральных данных для мобильной платформы экологического мониторинга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 153–169. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-153-169>.

Поступила в редакцию 18.04.2023

Подписана в печать 14.05.2023

Опубликована 30.06.2023

Mathematical Model of Multispectral Data Processing for a Mobile Ecology Monitoring Platform

Svetlana S. Spevakova¹, Alexander G. Spevakov¹ ✉, Irina V. Chernetskaya¹

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

✉ e-mail: aspev@yandex.ru

Abstract

The purpose of research is a mathematical justification of the process of processing multispectral data in order to detect local environmental pollution zones with the possibility of classifying the pollutant.

Methods. The fundamentals of the applied theory of stochastic systems based on equations for multidimensional characteristic functions and functionals are used as a basic mathematical apparatus. When determining a contaminant, a criterion reflecting the ability of objects obeying Lambert's law is used. To solve the problem of object classification, approaches using binary logistic regression are applied. Statistical methods of analysis were used to evaluate the results of the study.

Results. The obtained partial mathematical models allow us to take into account many factors affecting mobile environmental monitoring platforms operating in automatic mode. Substantiate the possibility of remote analysis of local environmental pollution zones, with the possibility of determining pollutants such as hydrocarbons, phosphate ions, etc., as well as searching for unauthorized locations of construction and household garbage. They increase the accuracy characteristics by 1,3 times when determining the parameters of selected objects due to the processing of data obtained in various spectral ranges. They contribute to reducing the computational complexity of the classification algorithm by 1,1 times, taking into account the volume of input data in a limited spectral range and reducing the resolution of the reference object, while not affecting the accuracy of classification.

Conclusion. A mathematical model has been developed for processing data and images obtained in several spectral ranges during the operation of a multispectral device for an autonomous mobile environmental monitoring platform, which makes it possible to identify objects in the field of view of the device from a mobile platform, to obtain a detailed image of working scene objects with spatial reference relative to the coordinate system used, a distinctive feature of which is to increase the accuracy of calculating the coordinates of local zones pollution, and increasing the reliability of the classification of objects based on the characteristics of diffusive reflectivity in various spectral ranges.

Keywords: mathematical model; mobile platforms; environmental monitoring; classification of pollutants.

Funding: The study was supported by the State Assignment of the Ministry of science and higher education of the Russian Federation (project No. 0851-2020-0032).

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

For citation: Spevakova S. S., Spevakov A. G., Chernetskaya I. V. Mathematical Model of Multispectral Data Processing for a Mobile Ecology Monitoring Platform. *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(2): 153–169. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-153-169>.

Received 18.04.2023

Accepted 14.05.2023

Published 30.06.2023

Введение

По данным Продовольственной и сельскохозяйственной Организации Объединённых Наций, к 2023 г. сложилась критическая ситуация, связанная с ухудшением качества воды, что представляет угрозу для безопасности пищевых продуктов и продовольственной безопасности [1]. Во многих регионах это связано с урбанизацией и промышленным производством, но в областях с традиционно развитым сельским хозяйством главным источником загрязнения является антропогенное воздействие на почвы пахотных земель и пастбищ, в результате чего в пресной воде повышено содержание загрязняющих веществ. Наиболее распространёнными являются фосфат-ионы, появляющиеся из-за рассыпанных по полям удобрений и моющих средств (полифосфаты), а также азотсодержащие вещества. Поэтому необходимо систематически проводить мониторинг водных ресурсов с целью определения очагов, степени загрязнения и поиска источников. Традиционные методы проведения мониторинга с помощью стационарного оборудования связаны с высокой трудоемкостью, но обладают высокой точностью. Поэтому для выявления потенциальных зон загрязнения можно использовать автономные мобильные платформы экологического мониторинга, полученная с их помощью карта загрязнения способствует выявлению источников загрязнения и приводит к снижению трудоемкости традиционного мониторинга.

На основе анализа научных публикаций [2; 3; 4; 5; 6; 7] было выявлено, что для экологического мониторинга применяются мобильные платформы, оснащенные мультиспектральными датчиками, маршрут следования которых задается оператором, информация об окружающей обстановке, накапливается на съемном носителе и обрабатывается в лаборатории на стационарном вычислительном устройстве, что не позволяет в процессе мониторинга получать информацию в реальном времени и оперативно проводить поиск очагов загрязнений. Также в качестве мультиспектральных датчиков применяются мультиспектральные камеры, используемые в сельском хозяйстве [8], что не всегда позволяет качественно проводить экологический мониторинг в связи с несовпадением спектральных диапазонов при решении таких задач.

Анализ современных методов и средств дистанционного диагностирования природной среды с использованием мультиспектральных датчиков [9; 10; 11; 12; 13; 14] показал, что для контроля уровня экологической безопасности и увеличения оперативности реагирования на инциденты необходимо применять автоматизированные комплексы, обрабатывающие данные в реальном масштабе времени, что накладывает ограничения на сложность алгоритмов обработки данных и объем обрабатываемой информации.

Таким образом, для решения задач экологического мониторинга с помощью автономных мобильных устройств

необходимо синтезировать математические модели, на основе которых строятся перспективные методы, алгоритмы и устройства, используемые в экологическом мониторинге и обрабатывающие информацию в различных спектральных диапазонах.

Материалы и методы

Для интерпретации информации об окружающей среде с использованием мультиспектральных оптико-электронных датчиков рассмотрим сигнал на их выходе. Мультиспектральный датчик представляет собой оптико-электронное устройство, состоящее из пяти матричных фотоприемников с зарядовой связью (ДИ), оснащенных специальными объективами и светофильтрами, настроенными на определенный спектральный диапазон: синий, зеленый, красный, предынфракрасный, ближний инфракрасный.

Математическая модель M_{PS} функционирования мультиспектрального устройства для автономной мобильной платформы экологического мониторинга состоит из следующих частных подмоделей.

Математическая модель M_{inp} ввода данных с оптико-электронных датчиков записывается в виде

$$I_n(x, y) = M_{inp}(E(u, w), S), \quad (1)$$

где $I_n(x, y)$ – амплитуда яркости пиксела на изображении с n -го датчика с координатами (x, y) ; E – поток излучения непрерывной рабочей сцены из точки с координатами (u, w) ; S – спектральный диапазон датчика.

Для повышения точности определения дальности и для осуществления автоматической калибровки мультиспектральных оптико-электронных датчиков, а также формирования дополнительного канала данных для определения концентрации углеводородов в приземном слое в систему введен лазерный комплекс, состоящий из двух генераторов, математическая модель которого имеет вид [15; 16]

$$P(R) = M_{inpL} \times \left(P_0 \Delta R \beta \pi(R) A_\gamma R^{-2} \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(r) dr \right] \right), \quad (2)$$

где $P(R)$ – мгновенное значение мощности, принимаемой с расстояния R ; P_0 – мощность лазерного импульса; $\Delta R = (c \cdot \tau) / 2$ – пространственное разрешение; c – скорость света; τ – длительность лазерного импульса; $\beta \pi$ – объемный коэффициент рассеяния назад; A_γ – эффективная площадь приемной апертуры; α – объемный коэффициент ослабления.

При решении задачи выделения множества объектов по последовательности кадров изображений, полученных в различных спектральных диапазонах, необходимо учитывать сложность условий наблюдения и временные ограничения на обработку. В процессе наблюдения часть объектов может не быть детектирована, поэтому для выделения большего количества реальных объектов и получения данных о них с большей точностью может применяться комплексный подход, позволяющий осуществлять объединение признаков выделенного объекта по серии изображений в

различных спектральных диапазонах или выбор конкретного спектрального диапазона, в котором предсказано поведение выделяемого объекта. Так, например, для определения признаков объектов, характеризующих концентрацию углеводородов, необходимо исследовать ближний инфракрасный диапазон, а для поиска концентрации хлореллы использовать зеленый канал. При обнаружении очагов загрязнений окружающей среды необходимо выделять признаки в различных спектральных диапазонах, так как для них свойственны нарушения почвенного или растительного покрова в совокупности с загрязняющим веществом.

Математическая модель M_q обнаружения множества объектов в поле зрения МУ путем получения мультиспектрального изображения, объединенного из кадров, полученных в нескольких спектральных зонах (видимой, зеленой (550 нм), красной (660 нм), предынфракрасной (RedEdge, 735 нм) и ближней инфракрасной (790 нм)), запишется как

$$Q_m = M_q(I_n, P(R), N_N), \quad (3)$$

где Q_m – множество объектов в пространстве, полученное посредством объединения отдельных сегментов изображений в разных спектральных диапазонах размером 64×64 пиксела, классифицированных как класс N_N .

Для привязки множества объектов Q_m к географической карте путем получения геоданных и определения их размеров необходимо кроме класса объекта определить координаты долготы и широты, а также скорректировать размер

объекта с учетом высоты наблюдения [17].

Рассмотрим процесс выделения движущегося объекта с подвижного основания. Пусть с пространством предметов наблюдения связана система координат $Oxyz$. С подвижным основанием оптического прибора свяжем систему координат $O_xO_yO_z$. Причем следующий порядок разворота подвижной системы координат: угол ψ в плоскости O_{xy} , угол ν в плоскости O_yO_z , угол γ в плоскости O_xO_y . Если угловые скорости поворотов обозначить соответственно ψ' , ν' , γ' , то по проекции угловых скоростей основания на оси подвижной системы координат могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} \omega_{x0} &= \nu' \cos \gamma - \psi' \cos \nu \sin \gamma, \\ \omega_{y0} &= \gamma' + \psi' \sin \nu, \\ \omega_{z0} &= \nu' \sin \gamma - \psi' \cos \nu \cos \gamma. \end{aligned} \quad (4)$$

Угловые скорости ω_{x0} , ω_{y0} , ω_{z0} могут быть измерены с помощью гироскопов, ориентированных по осям подвижной системы координат и закрепленных на основании, или данных, полученных с систем позиционирования.

Ориентация системы технического зрения задается двумя углами: σ и φ (рис. 1). На эти углы развернута относительно основания система координат $O'x_p y_p z_p$, связанная с системой технического зрения. Выберем эту систему координат таким образом, чтобы ось $O'x_p$ совпадала с главной оптической осью прибора, а оси $O'y_p$ и $O'z_p$ были ориентированы вдоль и поперек кадра. Вектор линейной скорости движения центра тяжести основания может быть представ-

лен в виде его проекции на оси основания v_{x0}, v_{y0}, v_{z0} . Рассмотрим уравнение движения системы в начальный момент времени, когда оси основания совпадают с осями неподвижной системы координат, т. е. $\psi = \nu = \gamma = 0$. Поместим две дополнительные системы координат, параллельно перенесенных из точки O в поле изображений $O_i x_i y_i z_i$ и в поле предметов $O_p x_p y_p z_p$ (рис. 1). Тогда с учетом расстояния между началами систем координат можно записать уравнения связи координат в двух системах:

$$\begin{aligned} x_p &= H + z_p \operatorname{ctg} \varphi, \\ y_p &= -(1/f)x_p y_i, \\ z_p &= -(1/f)x_p z_i, \end{aligned} \quad (5)$$

где $H = O'O_p$; $f = O'O_i$.

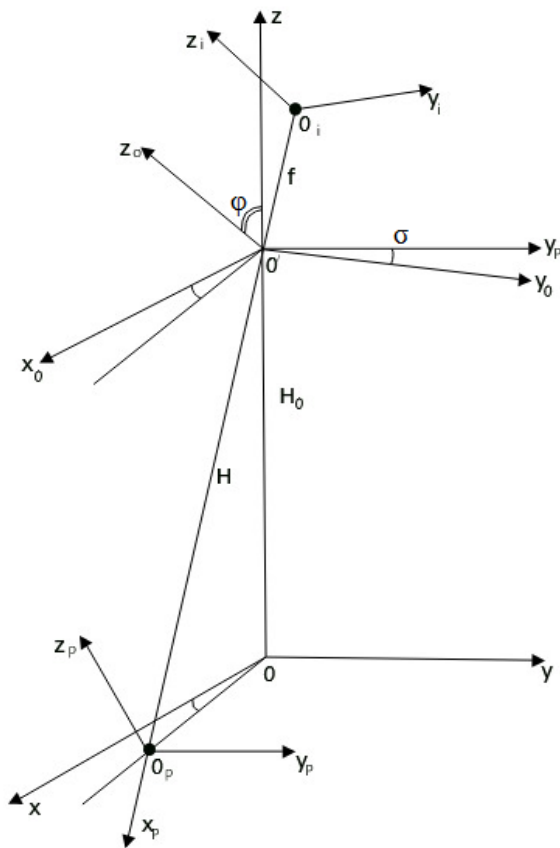


Рис. 1. Ориентация системы технического зрения

Fig. 1. Orientation of the vision system

Продифференцировав по времени последние два уравнения и выполнив преобразования относительно переменных \dot{y}_i, \dot{z}_i , получим:

$$\begin{aligned} \dot{y}_i &= -\frac{f}{x_p} \dot{y}_p + f \frac{y_p}{x_p^2} \dot{x}_p, \\ \dot{z}_i &= -\frac{f}{x_p} \dot{z}_p + f \frac{z_p}{x_p^2} \dot{x}_p. \end{aligned} \quad (6)$$

Произведя преобразование в уравнениях (7), можно получить:

$$\begin{aligned} x_p &= \frac{H}{1 + \frac{1}{f} z_i \operatorname{ctg} \varphi}, \\ y_p &= -\frac{H \cdot y_i}{f \left(1 + \frac{1}{f} z_i \operatorname{ctg} \varphi \right)}, \\ z_p &= -\frac{H \cdot z_i}{f \left(1 + \frac{1}{f} z_i \operatorname{ctg} \varphi \right)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Размер n -го выделенного объекта представлен в виде значений $\Delta x_{p_n}, \Delta y_{p_n}, \Delta z_{p_n}$, характеризующих размер ребер параллелепипеда, описанного вокруг выделенного объекта исходя из границ растрового изображения:

$$\begin{aligned} \langle x_{p_n}, y_{p_n}, z_{p_n}, \Delta x_{p_n}, \Delta y_{p_n}, \Delta z_{p_n} \rangle = \\ = M_{XYZ} (Q_n, x_i, y_i, z_i, \omega_{x0}, \omega_{y0}, \omega_{z0}), \end{aligned} \quad (8)$$

где $\langle x_{p_n}, y_{p_n}, z_{p_n} \rangle$ – координата геометрического центра n -го объекта.

При функционировании мобильной платформы экологического мониторинга маршрут следования и контрольные точки закладываются оператором на этапе подготовки полета, далее в процессе следования по маршруту в зоне видимости могут появиться очаги загрязнения, которые подлежат более подробному изучению путем облета такого

участка с определением координат, площади и вещества загрязнения. В таком случае строится адаптивный маршрут с посещением области загрязнения и возможности возврата на исходный маршрут. При построении такого маршрута необходимо учитывать кинематическую модель платформы и препятствия на пути следования.

Для построения оптимального маршрута автономной мобильной платформы экологического мониторинга с учетом обнаруженных очагов загрязнения и препятствий можно использовать различные кинематические модели. Рассмотрим решение построения оптимального маршрута для квадрокоптера (9):

$$\begin{cases} \dot{x} = v_c \cos \theta, \\ \dot{y} = v_c \sin \theta, \\ \dot{\theta} = \omega, \\ \omega \in [-\Omega, \Omega], \end{cases} \quad (9)$$

где $x(t), y(t) \in R$, x, y – позиционные координаты; $\theta \in R$ – угол курса; ω – скорость изменения курсового угла во времени; v_c – постоянная скорость полета; Ω – константа.

В качестве модели формирования оптимального маршрута применим метод С-Л-С [18], тогда оптимальный маршрут длиной L запишем в виде

$$L = \|AT_2\| + \|T_2T_3\| + \|T_3B\|, \quad (10)$$

где A – начальная опорная точка; B – конечная опорная точка; T_2T_3 – касательная линия, соединяющая окружности, на которых лежат точки A и B .

Тогда производная длины пути L от угла α будет иметь вид

$$\frac{dL}{d\alpha} = -M = \left(\vec{O_1T_3} \cdot \frac{\vec{T_3T_2}}{\|\vec{T_3T_2}\|} \right) \hat{z}, \quad (11)$$

где \hat{z} – единичный орт перпендикулярной плоскости O_{xy} .

Это выражение в закрытой форме необходимо для минимизации общей длины пути, а в случае обхода препятствия M можно рассматривать как плечо момента силы, действующей вдоль $\vec{T_3T_2}$ относительно точки O_1 , что является центром окружности, описывающей препятствие. Для достижения минимальной длины пути справедлива зависимость

$$\frac{dL}{d\alpha} = -M = 0. \quad (12)$$

Для определения адаптивного маршрута с учетом отклонения и (12) применим модифицированный алгоритм Литтла [19], тогда модель корректировки маршрута с учетом обнаруженных очагов загрязнения примет следующий вид:

$$\begin{aligned} < x_i, y_i \geq M_{map}(< X_i, Y_i >, \\ < x_{p_n}, y_{p_n}, z_{p_n}, \Delta x_{p_n}, \Delta y_{p_n}, \Delta z_{p_n} >), \end{aligned} \quad (13)$$

где $< x_i, y_i >$ – множество точек скорректированного маршрута для автономной мобильной платформы экологического мониторинга; $< X_i, Y_i >$ – множество точек исходного маршрута, заданного устройству в момент инициализации.

Разработанная математическая модель M_{PS} запишется в виде

$$\begin{aligned} M_{PS} = M_{map} \times \\ \times (M_{XYZ}(M_q(M_{fn}(M_{inp}(E(u, w), S)), M_{impl}))) \end{aligned} \quad (14)$$

и описывает процесс построения маршрута для автономной мобильной платформы экологического мониторинга с учетом выделенных на пути следования

объектов, характеризующих зону загрязнения с типом загрязняющего вещества.

Новизна разработанной математической модели заключается в поиске, обнаружении и определении координат участков локального загрязнения при экологическом мониторинге с учетом формы, площади и загрязняющего вещества, с возможностью формирования адаптивного оптимального маршрута следования к таким участкам на основе информации, полученной в различных спектральных диапазонах, от датчиков, функционирующих в различных спектральных диапазонах, с подвижной системы наблюдения. Повышение точности расчета расстояния до объекта и гео-

метрических параметров зоны загрязнения достигается за счет автоматической калибровки ДИ с использованием информации от лазерного дальномера.

Результаты и их обсуждение

Для оценки адекватности математической модели обработки мультиспектральных данных для мобильной платформы экологического мониторинга было проведено моделирование с исходными входными данными в виде изображений, полученных в видимом и В-, G-, R-, RE-, NIR-диапазонах с различным разрешением. Изображение, полученное в видимом диапазоне, представлено ниже (рис. 2).



Рис. 2. Изображение в видимом диапазоне

Fig. 2. Image in the visible range

Задачей обработки изображений являлось обнаружение локальных зон загрязнения окружающей среды строительным мусором, классификатор

выделяемых объектов N_N был обучен на трех классах, которые характеризуются признаками для бетона, картона и пластика (рис. 3).

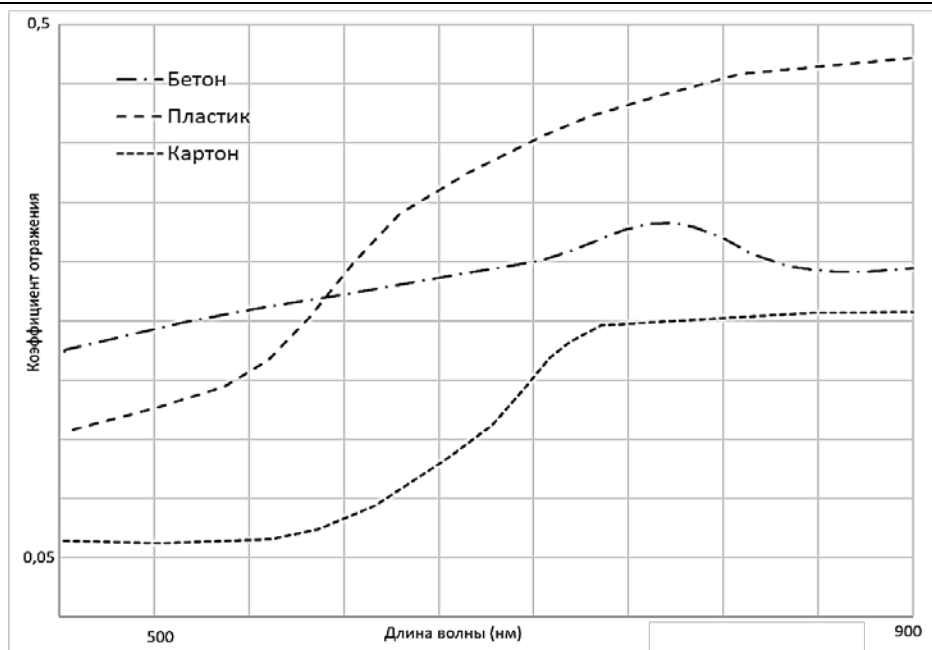


Рис. 3. Спектральные характеристики материалов

Fig. 3. Spectral characteristics of materials

Для выявления признаков используется классификация с обучением на основе мультииндексной классификации эталонных объектов по виду загрязняющих веществ. Для разделения объектов был предложен индекс на основе треугольных вегетационных индексов

ТИ-классификации. Треугольные индексы зелени разработаны под каналы спутниковых сканеров и определяют площадь треугольника, отражающего спектральные особенности хлорофилла А и каротиноидов, пример таких индексов приведен ниже (табл. 1).

Таблица 1. Треугольные вегетационные индексы ТИ [20]

Table 1. Triangular vegetation indices TI [20]

Наименование индекса Name of the index	Расчетная формула Calculation formula
TGI (Triangular Greenness Index)	$TGI = -0,5 \cdot [(660 - 480) \cdot (RED - GREEN) - (660 - 545) \cdot (RED - BLUE)]$
TRI (Triangular Red Index)	$TRI = -0,5 \cdot [(545 - 830) \cdot (GREEN - RED) - (545 - 660) \cdot (GREEN - NIR)]$
TRNI (Triangular Red Nir Index)	$TRNI = -0,5 \cdot [(830 - 660) \cdot (NIR - RED)]$

Для группы данных индексов был разработан поправочный шаблон, корректирующий диапазон длин волн с учетом классифицирующих веществ. Шаблон является универсальным решением и позволяет адаптировать параметры для

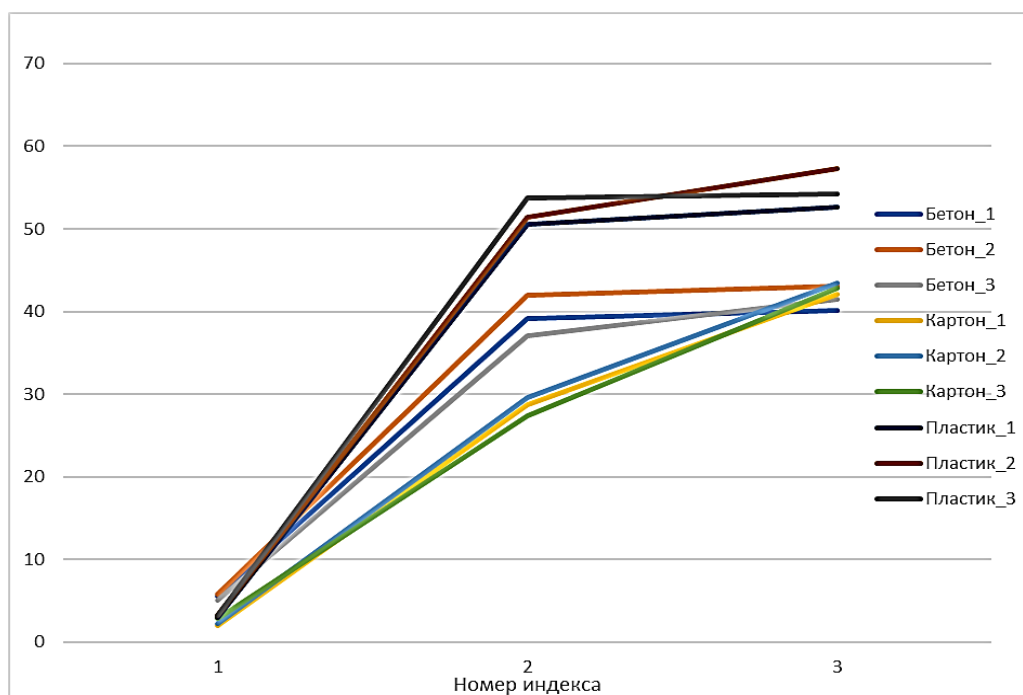
исследования различных веществ. В лабораторных условиях были проведены исследования предложенного классификатора на группе эталонных объектов. Рассмотрим результаты (табл. 2).

Таблица 2. Результаты исследования классификатора**Table 2.** Results of the classifier study

Наименование эталона Names objects	Индексы с учетом поправочного шаблона Indexes based on the correction pattern		
	1	2	3
Бетон_1	5,506	39,142	40,157
Бетон_2	5,809	42,021	43,122
Бетон_3	5,105	37,115	41,459
Картон_1	2,018	28,738	42,101
Картон_2	2,215	29,626	43,487
Картон_3	2,803	27,386	42,786
Пластик_1	3,015	50,583	52,641
Пластик_2	3,173	51,452	57,357
Пластик_3	3,254	53,725	54,267

В результате эксперимента по разделению категорий объектов, основанного на определенном типе классификации с обучением на основе групповой мультииндексной обработки спектров эталонов, получены результаты, которые

подтверждают возможность классификации с вероятностью 0,87–0,92. Разброс значений вероятности обусловлен составом анализируемых веществ (рис. 4). Данный подход позволил повысить точность классификации в 1,3 раза.

**Рис. 4.** Результаты исследования классификатора на эталонных объектах**Fig. 4.** Results of the classifier study on reference objects

Также в рамках экспериментальных исследований был проведен анализ точности выделения и классификации объектов по изображениям в видимом диапазоне и с использованием мультиспектральных изображений. При обработке изображе-

ния, представленного на рисунке 2, в видимом диапазоне проводилась оценка зависимости количества выделяемых объектов от разрешения изображения, результат выделения объектов на изображении с разрешением 1920×1080 приведен ниже (рис. 5).

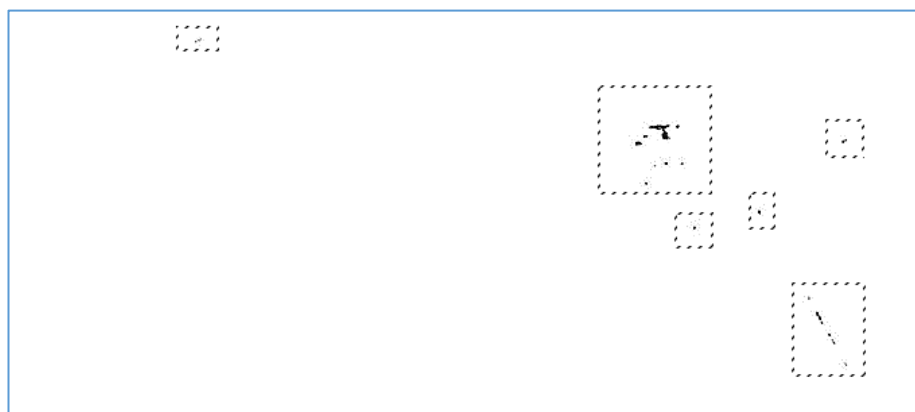


Рис. 5. Выделение объектов на изображении в видимом диапазоне

Fig. 5. Selection objects in the image in the visible range

Было выделено 6 групп объектов, классификацию которых выполнить не удалось. Из шести объектов при детальном изучении четыре объекта оказались ложными, характеризующими ланд-

шафт и тени. На следующем этапе эксперимента осуществлялся анализ той же сцены только в различных диапазонах и с разрешением 512×512 , результат которого представлен ниже (рис. 6).

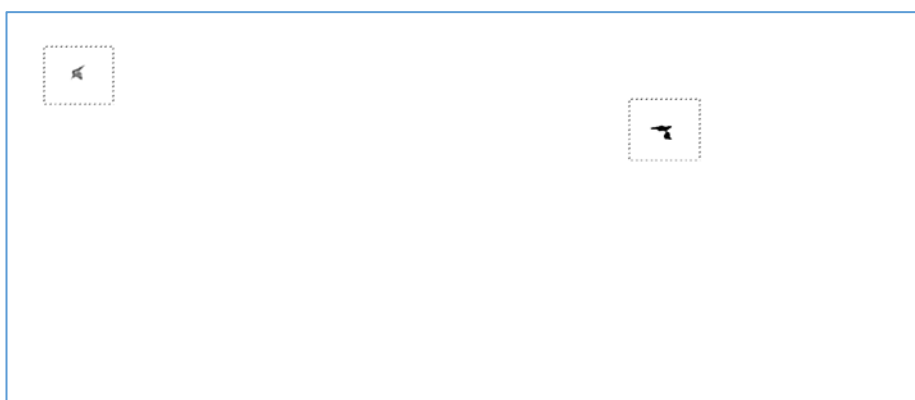


Рис. 6. Выделение объектов по изображениям в различных спектральных диапазонах

Fig. 6. Selection objects from images in different spectral ranges

Поиск осуществлялся для трех классов объектов бетона, картона и пластика. В итоге было обнаружено два объекта,

классифицированных как пластик (рис. 7, а) и бетон (рис. 7, б).



Рис. 7. Изображение объекта: а – пластик, б – бетон

Fig. 7. Image of the object: a – plastic, b – concrete

Изображения выделенных объектов позволили оценить их геометрические размеры с погрешностью 0,07 м с рабочей высоты БПЛА 53 м, площадь второго объекта составила 6,41 м². Эксперимент по оценке производительности

проводился на ЭВМ Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2650 v4, 32Gb DDR4, SSD NVME в среде разработки Clion с использованием Profiler, результаты представлены ниже (табл. 3).

Таблица 3. Результат эксперимента

Table 3. The result of the experiment

Эксперимент Experiment	Время исполнения, с Time, sec.	Объем памяти, Мб RAM, Mb
Видимы диапазон	3,2	18,6
Мультиспектральный диапазон	1,1	1,4

Выводы

Мультиспектральные датчики изображения в последнее время широко применяются для контролирования качества сельскохозяйственных культур. При решении такой задачи изначально известно нахождение исследуемой обла-

сти, например поля. Маршрут закладывается оператором на этапе подготовки, а оценка результатов производится позже в центре обработки данных. Процесс анализа окружающей среды иногда проходит в условиях неопределенности маршрута, так как изначально могут быть неизвестны зоны загрязнения.

В результате работы разработана математическая модель обработки мультиспектральных данных для мобильной платформы экологического мониторинга, обосновано применение мультиспектральных датчиков для исследования объектов, представляющих опасность окружающей среде. Предложено использовать метод классификации с обучением на основе мультииндексной классификации эталонных объектов по виду загрязняющих веществ с поправочным шаблоном. Для получения достоверного результата разработан метод автоматической калибровки мультиспектрального датчика. Для реализации режима автоматического поиска локальных областей загрязнения окружающей

среды разработана частная математическая модель корректировки маршрута с учетом обнаруженных очагов загрязнения, позволяющая автоматически отклоняться от заданного маршрута для исследования обнаруженных целевых объектов, и возвратом на исходный маршрут.

В рамках экспериментальных исследований проведено моделирование с целью оценки точности и быстродействия предложенных решений, подтверждена адекватность математической модели.

Разработанная математическая модель может использоваться при разработке методов, алгоритмов и мультиспектральных устройств для автономных мобильных платформ.

Список литературы

1. Состояние земельных, почвенных и водных ресурсов. URL: <https://www.fao.org/3/cb7654ru/online/src/html/chapter-1-5.html> (дата обращения: 12.03.2023).
2. Remote sensing-based water quality assessment for urban rivers: A study in linyi development area / S. Miao, C. Liu, B. Qian, Q. Miao // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. N 27. P. 34586–34595.
3. Assessment of some water quality parameters in the Red River downstream, Vietnam by combining field monitoring and remote sensing method / T. T. Tham, T. L. Hung, T. T. Thuy, V. T. Mai, L. T. Trinh, C. V. Hai, T. B. Minh // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. N 29. P. 41992–42004.
4. Extraction of Urban Water Bodies from High-Resolution Remote-Sensing Imagery Using Deep Learning / Y. Chen, R. Fan, X. Yang, J. Wang, A. Latif // *Water*. 2018. N 10. P. 585.
5. He Y., Jin S., Shang W. Water quality variability and related factors along the yangtze river using landsat-8 // *Remote Sensing*. 2021. N 13(12). P. 2241.
6. El Din E. S. Enhancing the accuracy of retrieving quantities of turbidity and total suspended solids using Landsat-8-based-principal component analysis technique // *Spatial Science*. 2019. N 66(3). P. 1–20.
7. Nutrient estimation by HJ-1 satellite imagery of Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir China / Y. Huang, D. Fan, D. Liu, L. Song, D. Ji, E. Hui // *Environmental Earth Sciences*. 2016. N 75(8). P. 633.

8. Спесвакова С. В. Мультиспектральный датчик изображения для автономного устройства экологического мониторинга // Юность и знания – гарантия успеха: сборник научных трудов VII Международной молодежной научной конференции: в 3 т. / под ред. А. А. Горохова. Курск: Университетская книга, 2020. С. 352–356.
9. Интеллектуальная система обработки изображений, получаемых с беспилотных летательных аппаратов / С. А. Филист, Р. А. Томакова, Н. Г. Нефедов, Е. И. Пузырев, И. Н. Горбачев // Известия ЮгоЗападного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 64–85. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-64-85>.
10. Schowengerdt R. A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing 3rd ed. San Diego, USA: Academic Press, 2007. 560 p.
11. Potential Applications of the Sentinel-2 Multispectral Sensor and the ENMAP hyperspectral Sensor in Mineral Exploration / C. Mielke, N. K. Boshce, C. Rogass, K. Segl, C. Gauert, H. Kaufmann // EARSel eProceedings. 2014. N 13(2). P. 93–102.
12. Multispectral demosaicking algorithm based on inter-channel correlation / J. Mizutani, S. Ogawa, K. Shinoda, M. Hasegawa, S. Kato // Proceedings of the 2014 IEEE Visual Communications and Image Processing Conference. Valletta, Malta: IEEE, 2014. P. 474–477.
13. Формирование пространства признаков для задач классификации сложных структурированных изображений на основе спектральных окон и структур нейронных сетей / С. А. Филист, К. Д. Али Кассим, А. А. Кузьмин, О. В. Шаталова, Е. А. Алябьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 4 (67). С. 56–68.
14. Vignolo A., Pochettino A., Cicerone D. Water quality assessment using remote sensing techniques: Medrano Creek, Argentina // Journal of Environmental Management. 2006. N 81. P. 429–433.
15. Чернецкая И. Е., Спесвакова С. В. Мультиспектральное оптико-электронное устройство для автономной мобильной платформы экологического мониторинга // Труды МАИ. 2020. № 114. С. 13.
16. Курдюмова Т. И., Григорьева А. Л. Математическая модель связи лазерного дальномера с типом лазерного излучения // Постулат. 2018. № 41(30). С. 46.
17. Спесвакова С. В., Чернецкая И. Е. Классификация объектов изображения сверточной нейронной сетью на основе диффузной отражательной способности материалов // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов и обработки изображений: материалы XVI Международной научно-технической конференции / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2021. С. 230–232.
18. Спесвакова С. В. Построение маршрута мобильного робота на основе анализа мультиспектральных данных // Интеллектуальные и информационные системы. Интеллект – 2019: сборник трудов конференции / Тульский государственный университет. Тула, 2019. С. 334–337.
19. An algorithm for the traveling salesman problem / J. D. C. Little [et al.] // Operations research. 1963. Vol. 11, no. 6. P. 972–989.

20. Фисенко Е. В. Анализ результатов использования методики мультииндексной обработки спектральных изображений подстилающей поверхности по комплексным данным дистанционного зондирования // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2019. № 3. С. 324–332.

References

1. Sostoyanie zemel'nykh, pochvennykh i vodnykh resursov [State of land, soil and water resources]. Available at: <https://www.fao.org/3/cb7654ru/online/src/html/chapter-1-5.html>. (accessed 12.03.2023)

2. Miao S., Liu C., Qian B., Miao Q. Remote sensing-based water quality assessment for urban rivers: A study in linyi development area // Environmental Science and Pollution Research, 2020, no. 27, pp. 34586–34595.

3. Tham T. T., Hung T. L., Thuy T. T., Mai V. T., Trinh L. T., Hai C. V., Minh T. B. Assessment of some water quality parameters in the Red River downstream, Vietnam by combining field monitoring and remote sensing method. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, no. 29, pp. 41992–42004.

4. Chen Y., Fan R., Yang X., Wang J., Latif A. Extraction of Urban Water Bodies from High-Resolution Remote-Sensing Imagery Using Deep Learning. *Water*, 2018, no. 10, p. 585.

5. He Y., Jin S., Shang W. Water quality variability and related factors along the yangtze river using landsat-8. *Remote Sensing*, 2021, no. 13(12), p. 2241.

6. El Din E. S. Enhancing the accuracy of retrieving quantities of turbidity and total suspended solids using Landsat-8-based-principal component analysis technique. *Spatial Science*, 2019, no. 66(3), pp. 1–20.

7. Huang Y., Fan D., Liu D., Song L., Ji D., Hui E. Nutrient estimation by HJ-1 satellite imagery of Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, no. 75(8), pp. 633.

8. Spevakova S. V. [Multispectral image sensor for an autonomous environmental monitoring device]. *Yunost' i znaniya – garantiya uspekha. Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii* [Youth and knowledge – a guarantee of success: collection of scientific papers of the VII International Youth Scientific Conference]; ed. by A. A. Gorokhov. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2020, pp. 352–356. (In Russ.)

9. Filist S. A., Tomakova R. A., Nefedov N. G., Puzyrev E. I., Gorbachev I. N. Intellectual'naya sistema obrabotki izobrazhenii, poluchaemykh s bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Intelligent image processing system obtained from unmanned aerial vehicles]. *Izvestiya YugoZapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments*

Engineering, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 64–85. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-4-64-85>.

10. Schowengerdt R. A. Remote Sensing: Models and Methods for Image processing. 3rd ed. San Diego, USA, Academic Press Publ., 2007. 560 p.

11. Mielke C., Boshce N. K., Rogass C., Segl K., Gauert C., Kaufmann H. Potential Applications of the Sentinel-2 Multispectral Sensor and the ENMAP hyperspectral Sensor in Mineral Exploration. *EARSel eProceedings*, 2014, no. 13(2), pp. 93–102.

12. Mizutani J., Ogawa S., Shinoda K., Hasegawa M., Kato S. Multispectral demosaicking algorithm based on inter-channel correlation. Proceedings of the 2014 IEEE Visual Communications and Image Processing Conference. Valletta, Malta, IEEE Publ., 2014, pp. 474–477.

13. Filist S. A., Ali Kassim K. D., Kuzmin A. A., Shatalova O. V., Alyabyev E. A. Formirovanie prostranstva priznakov dlya zadach klassifikatsii slozhnykh strukturirovannykh izobrazhenii na osnove spektral'nykh okon i struktur neironnykh setei [Formation of a feature space for classification problems of complex structured images based on spectral windows and neural network structures]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no. 4 (67), pp. 56–68.

14. Vignolo A., Pochettino A., Cicerone D. Water quality assessment using remote sensing techniques: Medrano Creek, Argentina. *Journal of Environmental Management*, 2006, no. 81, pp. 429–433.

15. Chernetskaya I. E., Spevakova S. V. Mul'tispektral'noe optiko-elektronnoe ustroystvo dlya avtonomnoi mobil'noi platformy ekologicheskogo monitoringa [Multispectral optoelectronic device for an autonomous mobile environmental monitoring platform]. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*, 2020, no. 114, p. 13.

16. Kurdyumova T. I., Grigorieva A. L. Matematicheskaya model' svyazi lazernogo dal'nomera s tipom lazernogo izlucheniya [Mathematical model of the connection of a laser rangefinder with a type of laser radiation]. *Postulat = Postulate*, 2018, no. 41(30), p. 46.

17. Spevakova S. V., Chernetskaya I. E. [Classification of image objects by convolutional neural network based on diffuse reflectivity of materials]. *Optiko-elektronnye pribory i ustroystva v sistemakh raspoznavaniya obrazov i obrabotki izobrazhenii. Materialy XVI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Optoelectronic devices and devices in image recognition and image processing systems. Proceedings of the XVI International Scientific and Technical Conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2021, pp. 230–232. (In Russ.)

18. Spevakova S. V. [Constructing the route of a mobile robot based on the analysis of multispectral data]. *Intellektual'nye i informatsionnye sistemy. Intellekt – 2019. Sbornik trudov konferentsii* [Intelligent and information systems. Intellect – 2019. Proceedings of the conference]. Tula, Tula State University Publ., 2019, pp. 334–337. (In Russ.)

19. Little J. D. C., eds. An algorithm for the traveling salesman problem. *Operations Research*, 1963, vol. 11, no. 6, pp. 972–989.

20. Fisenko E. V. Analiz rezul'tatov ispol'zovaniya metodiki mul'tiindeksnoi obrabotki spektral'nykh izobrazhenii podstilayushchei poverkhnosti po kompleksnym dannym distantsionnogo zondirovaniya [Analysis of the results of using the technique of multi-index processing of spectral images of the underlying surface based on complex remote sensing data]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos'emka = Proceedings of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography*, 2019, no. 3, С. 324–332.

Информация об авторах / Information about the Authors

Спевакова Светлана Викторовна, аспирант,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: sspev@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-1271-1275

Svetlana V. Spevakova, Post-Graduate
Student, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: sspev@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-1271-1275

Спеваков Александр Геннадьевич, кандидат
технических наук, доцент, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: aspev@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-3940-9607

Alexander G. Spevakov, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: aspev@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-3940-9607

Чернецкая Ирина Евгеньевна, доктор
технических наук, доцент, заведующий кафедрой
вычислительной техники, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: white731@yandex.ru,
ORCID: 0009-0009-8254-9606

Irina E. Chernetskaya, Dr. of Sci.
(Engineering), Associate Professor, Head
of the Department of Computer Engineering,
Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: white731@yandex.ru,
ORCHID: 0009-0009-8254-9606

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-170-183>

Прогнозирование и ранняя диагностика бронхиальной астмы у работников, специализирующихся на аргонной сварке на основе нечетких математических моделей

И. Ю. Григоров¹ ✉, Л. В. Стародубцева¹, С. П. Серегин¹, Л. В. Шульга¹

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

✉ e-mail: grigorov.ighor@mail.ru

Резюме

Целью исследования является разработка нечетких математических моделей прогнозирования и ранней диагностики бронхиальной астмы, развивающейся под воздействием токсических веществ, выделяемых при аргонной сварке, обеспечивающих приемлемое для практической медицины качество принятия решений.

Методы. В работе использован метод синтеза нечетких математических моделей прогнозирования и ранней диагностики профессиональных заболеваний, провоцируемых действием промышленных ядохимикатов, разработанный в ЮЗГУ на базе методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил, позволяющий учитывать мультипликативную природу связей риска появления и развития профессиональных заболеваний с концентрацией и временем воздействия вредных химических веществ.

Результаты. С помощью выбранного метода были получены нечеткие гибридные модели прогнозирования и ранней диагностики производственной бронхиальной астмы у работников сварочных производств, в которых, помимо воздействий на организм человека озона, пылевых и фиброгенных факторов риска, учитываются неблагоприятные экологические и эргономические факторы в сочетании с особенностями индивидуального здоровья.

В ходе моделирования и экспертного оценивания было показано, что полученная математическая модель обеспечивает уверенность в правильном прогнозе появления производственной бронхиальной астмы у работников сварочных производств не ниже 0,85, а ранней диагностики – не ниже 0,9.

Заключение. Получены гибридные нечеткие модели прогнозирования и ранней диагностики производственной бронхиальной астмы у работников сварочных производств, вызываемой наличием озона и фиброгенной пыли в сочетании с индивидуальными, экологическими и эргономическими факторами риска, качество работы которых было проверено на репрезентативных контрольных выборках. В ходе контрольной проверки было показано, что прогностическая модель обеспечивает диагностическую специфичность и чувствительность на уровне 0,87, а модель ранней диагностики – на уровне 0,92, что является хорошим результатом для рассматриваемого класса задач.

Ключевые слова: математические модели; нечеткая логика; производственная бронхиальная астма; прогнозирование; ранняя диагностика; профзаболевания; сварочное производство; озон; фиброгенная пыль.

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

Для цитирования: Прогнозирование и ранняя диагностика бронхиальной астмы у работников, специализирующихся на аргонной сварке на основе нечетких математических моделей / И. Ю. Григоров, Л. В. Стародубцева, С. П. Серегин, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 170–183. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-170-183>.

Поступила в редакцию 10.04.2023

Подписана в печать 07.05.2023

Опубликована 30.06.2023

© Григоров И. Ю., Стародубцева Л. В., Серегин С. П., Шульга Л. В., 2023

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023; 13(2): 170–183

Prediction and Early Diagnosis of Bronchial Asthma in Workers Specializing in Argon Welding Based on Fuzzy Mathematical Models

Igor Y. Grigorov¹ ✉, Lilia V. Starodubtseva¹,
Stanislav P. Seregin¹, Leonid V. Shulga¹

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

✉ e-mail: grigorov.ighor@mail.ru

Abstract

The purpose of research is to develop fuzzy mathematical models for predicting and early diagnosis of bronchial asthma developing under the influence of toxic substances released during argon welding providing an acceptable quality of decision-making for practical medicine

Methods. The paper uses the method of synthesis of fuzzy mathematical models of forecasting and early diagnosis of occupational diseases provoked by the action of industrial pesticides developed in the South-Eastern Federal University on the basis of the methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules allowing to take into account the multiplicative nature of the links between the risk of occurrence and development of occupational diseases with the concentration and time of exposure to harmful chemicals.

Results. Using the chosen method, fuzzy hybrid models of forecasting and early diagnosis of industrial bronchial asthma in welding workers were obtained in which, in addition to the effects of ozone, dust and fibrogenic risk factors on the human body, unfavorable environmental and ergonomic factors combined with individual health characteristics are taken into account.

In the course of modeling and expert evaluation, it was shown that the obtained mathematical model provides confidence in the correct prognosis of the occurrence of industrial bronchial asthma in welding workers at least 0.85, and early diagnosis at least 0.9.

Conclusion. Hybrid fuzzy models of forecasting and early diagnosis of industrial bronchial asthma in welding workers caused by the presence of ozone and fibrogenic dust in combination with individual, environmental and ergonomic risk factors were obtained, the quality of which was tested on representative control samples. During the control check, it was shown that the prognostic model provides diagnostic specificity and sensitivity at the level of 0.87, and the early diagnosis model - at the level of 0.92, which is a good result for the class of tasks under consideration.

Keywords: mathematical models; fuzzy logic; industrial bronchial asthma; forecasting; early diagnosis; occupational diseases; welding production; ozone; fibrogenic dust.

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

For citation: Grigorov I. Y., Starodubtseva L. V., Seregin S. P., Shulga L. V. Prediction and Early Diagnosis of Bronchial Asthma in Workers Specializing in Argon Welding Based on Fuzzy Mathematical Models. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023; 13(2): 170–183. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2023-13-2-170-183>.

Received 10.04.2023

Accepted 07.05.2023

Published 30.06.2023

Введение

Современное сварочное производство представляет собой лидера среди загрязнителей воздуха рабочей зоны, как индивидуального работника, так и рабочей зоны предприятия. Самый большой вред сварка может нанести самому сварщику. Благодаря применению технических и санитарно-гигиенических мероприятий (совершенствование технологии сварки, применение вентиляции, разработка эффективных средств индивидуальной защиты органов дыхания), опасность основного «номенклатурного» заболевания сварщиков – пневмокониоза – уменьшилась, но не исчезла. Работники, специализирующиеся на аргонодуговой сварке, работают чаще в закрытых помещениях или кабинках, что способствует правильному процессу сварки. Аргонодуговая сварка по праву считается более «чистым» процессом в отношении сварочного аэрозоля по сравнению с другими видами сварки, однако не стоит забывать о негативном воздействии любого вида сварки на организм рабочего.

Одним из негативных факторов, оказывающих токсическое действие, является появляющийся в процессе сварки в среде аргона озон¹ [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8]. Под воздействием УФ-излучения электродуги озон образуется из кислорода воздуха. При высоких температурах озон не стабилен по отношению к другим веществам, поэтому наличие других газов, сварочных аэрозолей и пыли ускоряет разрушение озона до кислорода. Анализ исследований показывает, что

особенно много озона образуется при сварке светоотражающих поверхностей (сплавов алюминия, нержавеющей стали).

Озон зачастую при специальной оценки условий труда не идентифицируется, и предприятие не использует защиты от этого газа. Невыявлению озона способствуют, вероятно, следующие обстоятельства:

- озон не обнаруживается из-за погрешности проведения измерений;
- правильное и эффективное использование локальной вентиляции;
- озон быстро разрушается до его выявления.

Выявление озона и принятие мер защиты от него являются приоритетными задачами, так как озон – вещество 1-го класса опасности (чрезвычайно опасное вещество), по особенностям воздействия на организм человека относится к веществам с остронаправленным механизмом действия, его ПДК 0,1 мг/м³. К негативным последствиям воздействия озона можно отнести воспаление верхних дыхательных путей, заболевания легких, головные боли, боли в груди, раздражение глаз, сухость во рту, мужское бесплодие.

Можно сказать, что по мере снижения весовых концентраций сварочного аэрозоля в воздухе рабочих мест сварщиков-аргонщиков на смену широко распространенных поражений легких выявляется новая, опасная для рабочих угроза, которую идентифицируют как профессиональную бронхиальную астму. При прогнозировании диагноза «профессиональная бронхиальная астма»

¹ Григоров И. Ю. Методы и средства прогнозирования и ранней диагностики профессиональных заболеваний работников гальванических

производств основе нечетких моделей принятия решений: дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2020. 147 с.

(ПБА) важно учитывать отсутствие предшествующего анамнеза, т. е. отсутствие субклинического или клинического течения заболевания на момент начала работы в данных условиях. Профессиональная бронхиальная астма – это респираторный аллергоз, протекающий с обструкцией дыхательных путей, развивающейся на фоне воздействия производственных аллергенов.

Большинство современных исследований в области профпатологии, включая заболевания среди работников, специализирующихся на сварке нержавеющей стали в среде аргона, ориентировано в основном на статистический анализ уровня заболеваемости без синтеза прогностических и диагностических решающих правил.

Известен ряд работ, посвящённых оценке риска возникновения профессиональных заболеваний без учёта преобладающих видов сварки, индивидуальных особенностей организма и сопутствующих экзогенных и эндогенных факторов риска. Проведенный анализ показал, что такой подход значительно снижает потенциально достижимые возможности по оказанию качественной медицинской помощи исследуемой категории пациентов.

Одним из действенных механизмов повышения качества медицинской помощи работникам, специализирующимся на аргонодуговой сварке, является надежное, точное и своевременное

выявление факторов риска с анализом последствий их воздействий на организм человека с целью повышения эффективности профилактики и лечения профессиональных заболеваний исследуемой категории специалистов.

Приняв во внимание накопленный на кафедре биомедицинской инженерии и собственный опыт, для достижения поставленной в работе цели было принято решение – использовать метод синтеза нечетких математических моделей прогнозирования и ранней диагностики профессиональных заболеваний, провоцируемых действием промышленных ядохимикатов, разработанный в ЮЗГУ и в различных вариантах описанный в работах^{1, 2} [1; 2; 9; 10; 11; 12; 13] на базе методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил, позволяющий учитывать мультипликативную природу связей риска появления и развития профессиональных заболеваний с концентрацией и временем воздействия вредных химических веществ.

Описание методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил приводится в работах [14; 15; 16; 17; 18; 19; 20].

Материалы и методы

В работе решается задача разработки нечетких математических моделей прогнозирования и ранней диагностики профессиональной бронхиальной

¹ Григоров И. Ю. Методы и средства прогнозирования и ранней диагностики профессиональных заболеваний работников гальванических производств основе нечетких моделей принятия решений: дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2020. 147 с.

² Медников Д. А. Интеллектуальная система прогнозирования ишемических рисков у машинистов локомотивных бригад: дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2021. 154 с.

астмы, развивающейся под воздействием паров озона (O_3) и фиброгенной пыли, выделяемых при аргоновой сварке в сочетании с другими существенными эндогенными и экзогенными факторами риска. Выбранный метод исследования базируется на методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), одним из основных элементов которых является функция принадлежности $\mu_{\ell}^d(x_j)$ к исследуемым классам состояний $\omega_{\ell} (\ell = 1, \dots, L)$ с базовой переменной, в качестве которой могут использоваться информативные признаки $(x_j) (j = 1, \dots, J)$, комплексные показатели Y_r , определяемые через функциональные зависимости от x_j комбинированные показатели Z_i , отражающие мультипликативное влияние вредных производственных факторов ($i = 1, 2, \dots, K$) на состояние здоровья и т. д. Верхний индекс d определяет тип решаемой задачи ($d = \Pi$ – прогноз; $d = P$ – ранняя диагностика; $d = Д$ – дифференциальный диагноз и т. д.) [14; 15; 16; 17; 18; 19; 20].

По аналогии с рекомендациями [1; 2; 9; 11; 12] для установления вклада вредных химических веществ в появление и развитие профессиональной бронхиальной астмы используется базовая переменная $Z_{\ell i}$, определяемая по формуле

$$z_{\ell i} = f_{\ell i} \left(\frac{c_i}{c_{\Pi i}} \right) \cdot f_{\ell i}^*(t_i), \quad (1)$$

где $c_{\Pi i}$ – ПДК вредных веществ ($ВВ_i$), выделяющихся в рабочую зону при сварке и резке металлов с идентификатором i ; C_i – средняя концентрация $ВВ_i$ за период наблюдения; t_i – время нахождения человека в контакте с $ВВ_i$; $f_{\ell i}(\cdot)$ – нормировочная функция степени влияния $ВВ_i$ с концентрацией C_i на появление и развитие заболеваний ω_{ℓ} с областью значения $[0, \dots, 1]$; $f_{\ell i}^*(\cdot)$ – нормировочная функция степени влияния времени воздействия $ВВ_i$ на появление и развитие патологии ω_{ℓ} с той же областью определения, что и $f_{\ell i}(\cdot)$.

Частная уверенность в возникновении и развитии профессиональных заболеваний ω_{ℓ} в соответствии с рекомендациями¹ [1; 9; 11; 12] определяется наборами функций принадлежности $\mu_{\ell}^d(Z_{\ell i})$ ($\ell = \Pi$ – профессиональная бронхиальная астма).

Уверенность UHR_{Π}^{Π} в прогнозе возникновения профессионального заболевания от факторов риска вредных веществ, находящихся в рабочих зонах сварочных производств, определяется нечеткой функцией:

$$UHR_{\Pi}^{\Pi} = Ag_{\Pi}^{\Pi} \left[\mu_{\Pi}^{\Pi}(Z_{\Pi i}) \right], \quad (2)$$

¹ Григоров И. Ю. Методы и средства прогнозирования и ранней диагностики профессиональных заболеваний работников гальванических

производств основе нечетких моделей принятия решений: дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2020. 147 с.

где Ag_{Π}^{Π} – агрегатор прогностических функций принадлежности для класса ω_{Π} ; $i = 1, 2, \dots$

Для ранних стадий профпатологии ω_{Π}

$$UHR_{\Pi}^P = Ag_{\Pi}^P [\mu_{\Pi}^P(Z_{\Pi_i})] \quad (3)$$

где Ag_{Π}^P – агрегатор диагностических функций принадлежности для класса ω_{Π} .

В качестве агрегирующих функций с учетом рекомендаций¹ [1; 2; 9; 10; 11; 12; 13] выбрана модифицированная формула Е. Шортлифа:

$$UHR_{\Pi}^d(q+1) = UHR_{\Pi}^d(q) + \mu_{\Pi}^d(Z_{\Pi_{i+1}})[1 - UHR(q)], \quad (4)$$

где q – номер итерации $UHR_{\Pi}^d(1) = \mu_{\Pi}^d(Z_{\Pi_1})$.

Анализ литературы и собственные исследования показали, что кроме промышленных аэрозолей на появление и развитие профессиональной бронхиальной астмы оказывает целый ряд существенных экзогенных и эндогенных факторов риска EFR_{Π}^d , таких как экологические, эргономические и индивидуальные факторы риска, которые определяются в результате опросов, осмотров, лабораторных и инструментальных методов исследования [1; 9; 11; 12]. В работах [1; 2; 9; 10; 11; 12; 13] достаточно подробно описаны механизмы расчета EFR_{Π}^d для различных типов профессиональных заболеваний.

Совокупный учет составляющих UHR_{Π}^d и EFR_{Π}^d дает финальную нечеткую модель принятия решений вида [2; 9; 19; 20]:

$$UF_{\Pi}^d = UHR_{\Pi}^d + EFR_{\Pi}^d - UHR_{\Pi}^d \cdot EFR_{\Pi}^d. \quad (5)$$

Результаты и их обсуждение

На экспертном уровне было согласовано решение: в качестве производственных факторов риска появления и развития профессиональной бронхиальной астмы выбрать пары O_3 (концентрация C_1) и фиброгенную пыль (концентрация C_2), для которых функции

$f_{\Pi_i} \left(\frac{C_i}{C_{\Pi_i}} \right)$ и $f_{\Pi_i}^*(t_i)$ модели (1) определя-

ются следующими выражениями:

$$f_{\Pi_1} \left(C_1 / C_{\Pi_1} \right) = \begin{cases} 0,056 X_1^2, & \text{если } X_1 \leq 3, \\ 1 - 0,056(X_1 - 6)^2, & \text{если } 3 \leq X_1 < 6, \\ 1, & \text{если } X_1 \geq 6, \end{cases}$$

$$f_{\Pi_1}^*(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t < 2, \\ 0,00255(t - 2)^2, & \text{если } 2 \leq t < 16, \\ 1 - 0,00255(t - 30)^2, & \text{если } 16 \leq X_1 < 30, \\ 1, & \text{если } t \geq 30, \end{cases}$$

$$f_{\Pi_2} (C_2 / C_{\Pi_2}) = \begin{cases} 0,03(X_2)^2, & \text{если } X_2 < 4, \\ 1 - 0,03(X_2 - 8)^2, & \text{если } 4 \leq X_1 < 8, \\ 1, & \text{если } X_2 \geq 8, \end{cases}$$

¹ Медников Д. А. Интеллектуальная система прогнозирования ишемических рисков у машинистов

локомотивных бригад: дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2021. 154 с.

$$f_2^*(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t < 4, \\ 0,0022(t-4)^2, & \\ \text{если } 4 \leq t < 19, \\ 1-0,0022(t-34)^2, & \\ \text{если } 19 \leq X_1 < 34, \\ 1, & \text{если } t \geq 34, \end{cases}$$

где $X_1 = C_1/C_{\Pi 1}$; $X_2 = C_2/C_{\Pi 2}$.

Функции принадлежности к классу ω_{Π} для выражения (2) определяются аналитическими выражениями следующего вида:

$$\mu_{\Pi}^{\Pi}(Z_{\Pi_1}) = \begin{cases} 0, & \text{если } Z_{\Pi_1} < 0,1, \\ 3,26(Z_{\Pi_1} - 0,1)^2, & \\ \text{если } 0,1 \leq Z_{\Pi_1} < 0,45, \\ 0,8 - 3,26(Z_{\Pi_1} - 0,8)^2, & \\ \text{если } 0,45 \leq Z_{\Pi_1} < 0,8, \\ 0,8, & \text{если } Z_{\Pi_1} \geq 0,8, \end{cases}$$

$$\mu_{\Pi}^{\Pi}(Z_{\Pi_2}) = \begin{cases} 0, & \text{если } Z_{\Pi_2} < 0,2, \\ 2,04(Z_{\Pi_2} - 0,2)^2, & \\ \text{если } 0,2 \leq Z_{\Pi_2} < 0,55, \\ 0,5 - 2,04(Z_{\Pi_2} - 0,9)^2, & \\ \text{если } 0,55 \leq Z_{\Pi_2} < 0,9, \\ 0,5, & \text{если } Z_{\Pi_2} \geq 0,9. \end{cases}$$

Применение функций $\mu_{\Pi}^{\Pi}(Z_{\Pi_1})$ и $\mu_{\Pi}^{\Pi}(Z_{\Pi_2})$ увеличивает уверенность в прогнозе появления и развития профессиональной бронхиальной астмы, поэтому уверенность в ω_{Π} по факторам риска химические вещества в промышленных аэрозолях сварочных производств (модель 4) определяется выражением

$$UHR_{\Pi}^{\Pi} = \mu_{\Pi}^{\Pi}(Z_{\Pi_1}) + \mu_{\Pi}^{\Pi}(Z_{\Pi_2}) - \mu_{\Pi}^{\Pi}(Z_{\Pi_1}) \cdot \mu_{\Pi}^{\Pi}(Z_{\Pi_2}). \quad (6)$$

Составляющая EFR_{Π}^{Π} модель 5 определяется выражением

$$EFR_{\Pi}^{\Pi}(p+1) = EFR_{\Pi}^{\Pi}(p) + \mu_{\Pi}^{\Pi}(X_{p+1})[1 - EFR_{\Pi}^{\Pi}], \quad (7)$$

где функции принадлежности $\mu_{\Pi}^{\Pi}(X_{p+1})$ и данных опросов, осмотров и инструментальных исследованиям определяются выражениями, приведенными в работах.

Финальная уверенность в прогнозе появления и развития профессиональной бронхиальной астмы UF_{Π}^{Π} определяется выражением (5).

В ходе математического моделирования и экспертного оценивания было показано, что прогностическая уверенность модели (7) превышает величину 0,85 при делении на 2 класса: заболит – не заболит ПБА.

Для определения ранней стадии заболевания ПБА модель (5) конкретизируется выражением

$$UF_{\Pi}^p(q+1) = UF_{\Pi}^p(q) + D_{\Pi}^p(q+1)[1 - UF_{\Pi}^p(q)], \quad (8)$$

где $UF_{\Pi}^p(1) = D_{\Pi}^p(1) = \mu_{\Pi}^p(ER_p)$; $D_{\Pi}^p(2) = \mu_{\Pi}^p(UF_{\Pi}^{\Pi})$; $D_{\Pi}^p(3) = \mu_{\Pi}^p(U_{01}^{\Pi})$.

Функция принадлежности $\mu_{\Pi}^p(ER_p)$ определяется по величине энергетического разбаланса меридиана легкого по методике, описанной в работах [7; 8; 21; 22].

Функция принадлежности $\mu_{\Pi}^p(UF_{\Pi}^{\Pi})$ определяется по базовой переменной, вычисляемой по формуле (5).

Функция принадлежности $\mu_{\Pi}^p(U_{01}^{\Pi})$ определяется по данным опросника, характеризующего наличие ранних стадий профессиональной бронхиальной астмы (удушье, кашель, экспираторная одышка, свистящее дыхание).

В ходе математического моделирования и экспертного оценивания было показано, что уверенность в наличии ранних стадий ПБА (модель 8) превышает величину 0,9.

Результаты математического моделирования и экспертного оценивания достаточно сильно зависят от субъективного экспертного мнения, что требует объективизации с использованием статистического анализа на репрезентативных контрольных выборках.

В ходе статистических контрольных испытаний на репрезентативных контрольных выборках (по 100 человек на каждый из контролируемых классов состояний) было установлено, что прогностическая модель (7) обеспечивает диагностические специфичность и чувствительность на уровне 0,87, а модель ранней диагностики (8) – на уровне 0,92, что является хорошим результатом для рассматриваемого класса задач.

При сварке нержавеющей стали или алюминия в среде защитного газа аргона обнаруживается превышение ПДК по озону. Наличие и правильное использование локальной вытяжки снижает концентрацию, но часто не позволяет достичь безопасного уровня. Поэтому не

стоит забывать, что для максимальной защиты органов дыхания сварщика необходимо дополнительно использовать средства индивидуальной защиты, причем не только от твердой составляющей сварочного аэрозоля, но и от газов, выделяющихся при сварке, в т. ч. озона. К таким СИЗОД могут относиться специальные фильтрующие полумаски (с дополнительной защитой от озона), полумаски из изолирующих материалов с фильтрами, а также системы с принудительной подачей воздуха.

В результате проведенных исследований было установлено, что задачи прогнозирования и ранней диагностики профессиональной бронхиальной астмы относят к классу плохо формализуемых задач, которые следует решать, используя технологию мягких вычислений. Методика решения задач со схожей структурой данных в Юго-Западном государственном университете показывает, что удобно для выбранной в работе задачи использовать методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил. Используя представленную методологию, с учетом специфики вредных факторов риска сварочных производств, в сочетании с другими экзогенными и эндогенными факторами риска были получены нечеткие математические модели, позволяющие решать поставленные в работе задачи с приемлемым для профпатологии качеством.

Выводы

Повышенный уровень профессиональной заболеваемости объясняется интенсивной химизацией производства

и постоянным появлением новых промышленных аллергенов. Разработкой медицинской стратегии в отношении профессиональной бронхиальной астмы занимаются специалисты в области профпатологии. Предлагаемые математические модели позволяют обеспечивать прогноз появления и развития профессиональной бронхиальной астмы с уверенностью не ниже 0,85, определять

раннюю стадию этой патологии с уверенностью не хуже 0,9, что позволяет рекомендовать полученные результаты в практику врачей профпатологов.

Полученные математические модели следует использовать в медицинской практике как в виде программного обеспечения смартфонов и планшетных компьютеров, так и в составе мощных систем поддержки принятия решений, включая телемедицинские системы.

Список литературы

1. Корневский Н. А., Григоров И. Ю., Разумова К. В. Математические модели прогнозирования возникновения и развития бронхиальной астмы у работников гальванических цехов // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сборник научных статей по итогам VI Международной научной конференции. М.: Конверт, 2019. С. 61–63.
2. Метод синтеза нечетких моделей и ранней диагностики профессиональных заболеваний работников гальванических производств / Н. А. Корневский, И. Ю. Григоров, Т. Н. Говорухина, Р. А. Крупчатников // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2019. Т. 18, № 3. С. 163–169.
3. Безопасность жизнедеятельности и охрана труда в строительстве / А. В. Фролов, В. А. Лепихова, Н. В. Ляшенко, С. Л. Пушенко, Н. Н. Чибинев, А. С. Шевченко. Ростов н/Д: Феникс, 2009. 566 с.
4. Трушкова Е. А., Ладная Е. В. Особенности профессиональных заболеваний электросварщиков при выполнении сварочных работ на производстве // Молодой ученый. 2016. № 18.1 (122.1). С. 25–27.
5. Глебова Е. В. Производственная санитария и гигиена труда. М.: Высшая школа, 2005. 382 с.
6. Р 2.2.2006-05. Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. Введ. 2005-11-01. М.: Издательство стандартов, 2005. 133 с.
7. Контроль динамики развития ишемических процессов в сердце по энергетическому разбалансу меридианных структур организма / Н. А. Корневский, И. Ю. Григоров, К. В. Разумова, В. А. Горбунов, В. В. Дмитриева, С. В. Дегтярев // Медицинская техника. 2020. № 1 (319). С. 47–49.
8. Корневский Н. А., Григоров И. Ю., Разумова К. В. Метод прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний по энергетическому разбалансу меридианных структур организма // Известия Юго-Западного государственного университета.

Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 2 (31). С. 75–90.

9. Экспертная система контроля состояния пациентов, контактирующих с промышленными ядохимикатами / С. А. Филист, Р. И. Сафронов, Л. В. Шульга, Г. В. Сипливый, Е. В. Крикунова, Н. А. Милостная // Медицинская техника. 2021. № 4. С. 30–32.

10. Экспертная система прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний работников электроэнергетики / Н. А. Корневский, Р. И. Сафронов, Л. В. Шульга, Г. В. Сипливый, Е. В. Крикунова // Медицинская техника. 2021. № 6. С. 48–51.

11. Использование технологий мягких вычислений для прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний работников агропромышленного комплекса / Р. В. Степашов, Н. А. Корневский, А. В. Серебровский, Т. Н. Говорухина. Курск: Издательство Курской государственной сельскохозяйственной академии им. И. И. Иванова, 2018. 235 с.

12. Нечеткие математические модели прогнозирования и ранней диагностики профессиональных заболеваний сельскохозяйственных рабочих, контактирующих с ядохимикатами / Н. А. Корневский, Р. В. Степашов, Р. А. Крупчатников, В. В. Аксёнов, Н. Л. Коржук // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6, № 3(22). С. 5–18.

13. Корневский Н. А., Медников Д. А., Стародубцев В. В. Метод синтеза моделей прогнозирования и ранней диагностики профессиональных заболеваний работников локомотивных бригад // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2020. Т. 19, № 3. С. 140–154.

14. Корневский Н. А. Проектирование систем принятия решений на нечетких сетевых моделях в задачах медицинской диагностики и прогнозирования // Телекоммуникации. 2006. № 6. С. 25–31.

15. Корневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1(289). С. 33–35.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. Корневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.
20. Оценка и управление состоянием здоровья обучающихся на основе гибридных интеллектуальных технологий / Н. А. Корневский, А. Н. Шуткин, С. А. Горбатенко, В. И. Серебровский. Старый Оскол: ТНТ, 2016. 472 с.
21. Корневский Н. А., Буняев В. В., Яцун С. М. Компьютерные системы ранней диагностики состояния организма методами рефлексологии / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова. Новочеркасск, 2003. 206 с.
22. Корневский Н. А., Крупчатников Р. А. Информационно-интеллектуальные технологии в рефлексодиагностике и рефлексотерапии. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 528 с.

References

1. Korenevsky N. A., Grigorov I. Yu., Razumova K. V. [Mathematical models for predicting the occurrence and development of bronchial asthma in electroplating shop workers]. *Peredovye innovatsionnye razrabotki. Perspektivy i opyt ispol'zovaniya, problemy vnedreniya v proizvodstvo. Sbornik nauchnykh statei po itogam VI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [Advanced innovative developments. Prospects and experience of use, problems of introduction into production. A collection of scientific articles based on the results of the VI International Scientific Conference]. Moscow, Konvert Publ., 2019, pp. 61–63. (In Russ.)
2. Korenevsky N. A., Grigorov I. Y., Govorukhina T. N., Krupchatnikov R. A. Metod sinteza nechetkikh modelei i rannei diagnostiki professional'nykh zabolevanii rabotnikov gal'vanicheskikh proizvodstv [Method of synthesis of fuzzy models and early diagnosis of occupational diseases of electroplating workers]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2019, vol. 18, no. 3, pp. 163–169.
3. Frolov A. V., Lepikhova V. A., Lyashenko N. V., Pushenko S. L., Chibinev N. N., Shevchenko A. S. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti i okhrana truda v stroitel'stve [Life safety and labor protection in construction]. Rostov-on-Don, Phoenix Publ., 2009. 566 p.
4. Trushkova E. A., Ladnaya E. V. Osobennosti professional'nykh zabolevanii elektrosvarshchikov pri vypolnenii svarochnykh rabot na proizvodstve [Features of occupational diseases of electric welders when performing welding work in production]. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*, 2016, no. 18.1 (122.1), pp. 25–27.
5. Glebova E. V. Proizvodstvennaya sanitariya i gigiena truda [Industrial sanitation and occupational hygiene]. Moscow, Higher School Publ., 2005. 382 p.
6. R 2.2.2006-05. Gigiena truda. Rukovodstvo po gigienicheskoi otsenke faktorov rabochei sredy i trudovogo protsessa. Kriterii i klassifikatsiya uslovii truda. Vved. 2005-11-01 [Guide 2.2.2006-05. Occupational hygiene. Guidelines for the hygienic assessment of factors

of the working environment and the labor process. Criteria and classification of working conditions. Introduction. 2005-11-01]. Moscow, Publishing House of Standards, 2005. 133 p.

7. Korenevsky N. A., Grigorov I. Y., Razumova K. V., Gorbunov V. A., Dmitrieva V. V., Degtyarev S. V. Kontrol' dinamiki razvitiya ishemicheskikh protsessov v serdtse po energeticheskomu razbalansu meridiannykh struktur organizma [Control of the dynamics of the development of ischemic processes in the heart by the energetic imbalance of the meridian structures of the body]. *Meditinskaya tekhnika = Medical Technique*, 2020, no. 1 (319), pp. 47–49.

8. Korenevsky N. A., Grigorov I. Y., Razumova K. V. Metod prognozirovaniya i diagnostiki professional'nykh zabolevaniy po energeticheskomu razbalansu meridiannykh struktur organizma [The method of forecasting and diagnosis of occupational diseases by the energy imbalance of the meridian structures of the body]. *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. 2 (31), pp. 75–90.

9. Filist S. A., Safronov R. I., Shulga L. V., Siplivy G. V., Krikunova E. V., Milostnaya N. A. Ekspertnaya sistema kontrolya sostoyaniya patsientov, kontaktiruyushchikh s promyshlennymi yadokhimikatami [Expert system for monitoring the condition of patients in contact with industrial pesticides]. *Meditinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2021, no. 4, pp. 30–32.

10. Korenevsky N. A., Safronov R. I., Shulga L. V., Siplivy G. V., Krikunova E. V. Ekspertnaya sistema prognozirovaniya i diagnostiki professional'nykh zabolevaniy rabotnikov elektroenergetiki [Expert system of forecasting and diagnostics of professional diseases of electric power industry workers]. *Meditinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2021, no. 6, pp. 48–51.

11. Stepashov R. V., Korenevsky N. A., Serebrovsky A. V., Govorukhina T. N. Ispol'zovanie tekhnologii myagkikh vychislenii dlya prognozirovaniya i diagnostiki professional'nykh zabolevaniy rabotnikov agropromyshlennogo kompleksa [The use of soft computing technologies for forecasting and diagnostics of occupational diseases of workers of the agro-industrial complex]. Kursk, State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov Publ., 2018. 235 p.

12. Korenevsky N. A., Stepashov R. V., Krupchatnikov R. A., Aksenov V. V., Korzhuk N. L. Nechetkie matematicheskie modeli prognozirovaniya i rannei diagnostiki professional'nykh zabolevaniy sel'skokhozyaistvennykh rabochikh, kontaktiruyushchikh s yadokhimikatami [Fuzzy mathematical models of forecasting and early diagnosis of occupational diseases of agricultural workers in contact with pesticides]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technologies*, 2018, vol. 6, no. 3(22), pp. 5–18.

13. Korenevsky N. A., Mednikov D. A., Starodubtsev V. V. Metod sinteza modelei prognozirovaniya i rannei diagnostiki professional'nykh zabolevaniy rabotnikov lokomo-

tivnykh brigad [Method of synthesis of models for forecasting and early diagnosis of occupational diseases of locomotive crew workers]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh* = *System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2020, vol. 19, no. 3, pp. 140–154.

14. Korenevsky N. A. Proektirovanie sistem prinyatiya reshenii na nechetkikh setevykh modelyakh v zadachakh meditsinskoi diagnostiki i prognozirovaniya [Designing decision-making systems based on fuzzy network models in the tasks of medical diagnostics and forecasting]. *Telekommunikatsii* = *Telecommunications*, 2006, no. 6, pp. 25–31.

15. Korenevsky N. A. Ispol'zovanie nechetkoi logiki prinyatiya reshenii dlya meditsinskikh ekspertnykh sistem [Using fuzzy logic of decision-making for medical expert systems]. *Meditsinskaya tekhnika* = *Medical Equipment*, 2015, no. 1(289), pp. 33–35.

16. Korenevsky N. A. Proektirovanie nechetkikh reshayushchikh setei, nastraivaemykh po strukture dannykh dlya zadach meditsinskoi diagnostiki [Design of fuzzy decision networks configurable by data structure for medical diagnostics tasks]. *Sistemnyi analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh* = *System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2005, vol. 4, no. 1, pp. 12–20.

17. Korenevsky N. A. Metod sinteza geterogennykh nechetkikh pravil dlya analiza i upravleniya sostoyaniem biotekhnicheskikh sistem [Method of synthesis of heterogeneous fuzzy rules for analysis and control of the state of biotechnical 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*, 2013, no. 2, pp. 99–103.

18. Korenevsky N. A., Bashir A. S., Gorbatenko S. A. Sintez gibridnykh nechetkikh pravil dlya prognozirovaniya, otsenki i upravleniya sostoyaniem zdorov'ya v ekologicheski neblagopriyatnykh regionakh [Synthesis of hybrid odd rules for forecasting, assessment and management of health in economically unfavorable regions]. *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*, 2013, no. 4, pp. 69–73.

19. Korenevsky N. A., Rodionova S. N., Khripina I. I. Sintez gibridnykh nechetkikh pravil dlya prognozirovaniya, otsenki i upravleniya sostoyaniem zdorov'ya v ekologicheski neblagopriyatnykh regionakh [Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems]. Stary Oskol, TNT, 2019. 472 p.

20. Korenevsky N. A., Shutkin A. N., Gorbatenko S. A., Serebrovsky V. I. Otsenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya obuchayushchikhsya na osnove gibridnykh intellektual'nykh tekhnologii [Assessment and management of students' health on the basis of hybrid intellectual technologies]. Stary Oskol, TNT Publ., 2016. 472 p.

21. Korenevsky N. A., Bunyaev V. V., Yatsun S. M. Komp'yuternye sistemy rannei diagnostiki sostoyaniya organizma metodami refleksologii [Computer systems for early diagnosis of the state of the body by methods of reflexology]. Novocherkassk, South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M. I. Platov Publ., 2003. 206 p.

22. Korenevsky N. A., Krupchatnikov R. A. Infomatsionno-intelektual'nye tekhnologii v refleksodiagnostike i refleksoterapii [Information and intellectual technologies in reflexology and reflexotherapy]. Stary Oskol, TNT Publ., 2013. 528 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Григоров Игорь Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: grigorov.ighor@mail.ru, ORCID: 0000-0001-6207-8194

Igor Y. Grigorov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: grigorov.ighor@mail.ru, ORCID: 0000-0001-6207-8194

Стародубцева Лилия Викторовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: lilja-74@inbox.ru, ORCID: 0000-0001-6803-298X

Lilia V. Starodubtseva, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: lilja-74@inbox.ru, ORCID: 0000-0001-6803-298X

Серегин Станислав Петрович, доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: seregin.stanislaw2011@yandex.ru

Stanislav P. Seregin, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: seregin.stanislaw2011@yandex.ru

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

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

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2 Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

– статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;

– разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа.

– сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);

– лицензионный договор.

3. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами.

4. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

5. **Публикация бесплатная.**

6. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны – 2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

7. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (строчные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, список литературы. Авторы, название, аннотация и ключевые слова, список литературы приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается аннотация (200–250 слов), отражающая краткое содержание статьи.

8. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы (Ω , η , β , μ , ω , ν и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций (\sin , \cos , \lg 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/>.