

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

**Юго-Западного
государственного университета**

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

Научный журнал

Том 12 № 2 / 2022

Proceedings

**of the Southwest
State University**

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

Scientific Journal

Vol. 12 № 2 / 2022



**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:

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

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

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

Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки) – 2. 2.15.

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

Будневский Андрей Валерьевич, д-р мед. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия);

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Сизов Александр Семенович, д-р техн. наук, профессор, 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);

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, 2022



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. В. Кофановой

Подписано в печать 27.06.2022. Формат 60x84/8.

Дата выхода в свет 27.07.2022.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 19,2.

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:

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

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

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

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

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

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

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

Andrey V. Budnevsky, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Alexander S. Sizov, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

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

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. V. Kofanova

16+

© Southwest State University, 2022



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

Signed for printing 27.06.2022. Format 60x84/8.

Release date 27.07.2022.

Offset paper. Printer's sheets: 19,2.

Circulation 1000 copies. Order 32.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ.....	8
Оригинальные статьи	
Концепция построения интеллектуальной информационно-телекоммуникационной системы по контролю и управлению жизнедеятельностью пчелиных семей	8
<i>Бабанин И. Г., Бабанина Е. Ю., Боголюбская А. А., Хмелевская А. В., Севрюков А. Е., Юдин И. С.</i>	
Разработка автоматизированной системы для информационного обеспечения природоохранной деятельности в регионе.....	27
<i>Иорданова А. В., Кирильчук И. О., Семенова А. Е.</i>	
Разработка и реализация интернет-платформы агрегатора автосервисов.....	40
<i>Лапина Т. И., Сарычев В. А., Цеека В. Ю.</i>	
РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ.....	59
Оригинальные статьи	
Алгоритм оптимизации модели Войта в классификаторах функционального состояния живых систем	59
<i>Миросников А. В., Шаталова О. В., Ефремов М. А., Стадниченко Н. С., Новоселов А. Ю., Павленко А. В.</i>	
Многопоточная архитектура программного обеспечения обработки многоканальных медицинских сигналов	76
<i>Мяснянкин М. Б., Кузьмин А. А., Серебровский В. В., Алдохин Е. А.</i>	
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ.....	98
Оригинальные статьи	
Оценка фракционной сатурации крови у пилота воздушного судна в условиях влияния динамических полётных факторов	98
<i>Коптев Д. С., Юдин И. С.</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	121
Оригинальные статьи	
Модельные исследования возможности широкополосной электроимпедансной спектроскопии по обнаружению и различению ишемических и геморрагических инсультов.....	121
<i>Бразовский К. С., Винокурова Д. А., Королюк Е. С.</i>	
Прогнозирование степени тяжести ишемии поражённого органа на основании обменных нарушений.....	135
<i>Корогодина С. В., Полякова А. В., Азарова П. С., Винников А. В., Быков А. В., Цымбал Е. В., Корневский Н. А.</i>	
Диагностика патологии внепеченочных желчных протоков по данным эндоскопической ультрасонографии с использованием нечетких математических моделей.....	149
<i>Белозеров В. А., Корневский Н. А., Коржук Н. Л.</i>	
К сведению авторов	165

CONTENT

INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS	8
Original articles	
The Concept of Building an Intelligent Information and Telecommunication System for Control and Management of the Life Activities of Bee Family.....	8
<i>Babanin I. G., Babanina E. Yu., Bogolyubskaya A. A., Khmelevskaya A. V., Sevryukov A. E., Yudin I. S.</i>	
Development of an Automated System for Information Support of Environmental Protection Activities in the Region	27
<i>Iordanova A. V., Kirilchuk I. O., Semenova A. E.</i>	
Development and Implementation of the Internet Platform of the Car Service Aggregate.....	40
<i>Lapina T. I., Sarychev V. A., Tsevka V. Y.</i>	
IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING	59
Original articles	
Method for Classification of the Functional State of Living Systems Based on Recurrent Voigt Models.....	59
<i>Miroshnikov A. V., Shatalova O. V., Efremov M. A., Stadnichenko N. S., Novoselov A. Yu., Pavlenko A. V.</i>	
Multithread Software Architecture for Processing Multichannel Medical Signals.....	76
<i>Myasnyankin M. B., Kuzmin A. A., Serebrovsky V. V., Aldokhin E. A.</i>	
SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING	98
Original articles	
Evaluation of Fractional Blood Saturation in an Aircraft Pilot Under the Influence of Dynamic Flight Factors.....	98
<i>Koptev D. S., Yudin I. S.</i>	
MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS.....	121
Original articles	
Modeling the Ability of Wide Band Electrical Impedance Spectroscopy to Detect and Differentiate Ischemic and Hemorrhagic Brain Stroke	121
<i>Brazovskii K. S., Vinokurova D. A., Koroluk E. S.</i>	
Prediction of the Severity of Ischemia of the Affected Organ on the Basis of Metabolic Disorders.....	135
<i>Korogodina S. V., Polyakova A. V., Azarova P. S., Vinnikov A. V., Bykov A. V., Tsymbal E. V., Korenevsky N. A.</i>	
Diagnosis the Pathology of Extrahepatic Bile Ducts According to Endoscopic Ultrasonography Using Fuzzy Mathematical Models	149
<i>Belozеров V. A., Korenevsky N. A., Korzhuk N. L.</i>	
Information for Authors	165

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-8-26>



Концепция построения интеллектуальной информационно-телекоммуникационной системы по контролю и управлению жизнедеятельностью пчелиных семей

И. Г. Бабанин¹ ✉, Е. Ю. Бабанина², А. А. Боголюбская¹, А. В. Хмелевская¹,
А. Е. Севрюков¹, И. С. Юдин¹

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

² ООО «Курскреставрация»
ул. Театральная 5а, г. Курск 305009, Российская Федерация

✉ e-mail: babanin_ivan@bk.ru

Цель исследования – разработка концепции построения автоматизированной системы по контролю и управлению высокоорганизованными насекомыми, а именно пчелиными колониями, на основе неструктурированных физически разнородных данных с использованием искусственных нейронных сетей.

Методы. При проведении исследований и разработки способа построения интеллектуальной системы контроля и управления жизнедеятельностью пчелиных семей использовались методы многокритериального анализа, инфологического подхода.

Результаты. Предложен концепт синтеза интеллектуальной информационно-телекоммуникационной системы по контролю и управлению жизнедеятельностью пчелиных семей с максимальной интеграцией в действующие региональные профильные структурные подразделения, отличающийся от существующих возможностью формирования онтологии по заданным тематическим запросам, автоматизированным централизованным контролем и управлением.

Заключение. В научной статье описано построение интеллектуальной информационно-телекоммуникационной системы на основе задач, необходимых для автоматизации технологических процессов, с целью повышения эффективности выполнения функций пчеловодческой деятельности, возможных потребителей услуг, предоставляемых синтезируемой системой.

Ключевые слова: интеллектуальный контроль и управление; пчеловодческая деятельность; инфология; рецепторно-исполнительная среда; периферийная среда.

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

© Бабанин И. Г., Бабанина Е. Ю., Боголюбская А. А., Хмелевская А. В., Севрюков А. Е., Юдин И. С., 2022

Для цитирования: Концепция построения интеллектуальной информационно-телекоммуникационной системы по контролю и управлению жизнедеятельностью пчелиных семей / И. Г. Бабанин, Е. Ю. Бабанина, А. А. Боголюбская, А. В. Хмелевская, А. Е. Севрюков, И. С. Юдин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 2. С. 8–26. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-8-26>.

Поступила в редакцию 04.04.2022

Подписана в печать 05.05.2022

Опубликована 27.06.2022

The Concept of Building an Intelligent Information and Telecommunication System for Control and Management of the Life Activities of Bee Family

Ivan G. Babanin¹ ✉, Ekaterina Yu. Babanina², Anastasiya A. Bogolyubskaya¹, Alena V. Khmelevskaya¹, Aleksandr E. Sevryukov¹, Ilya S. Yudin¹

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

² LLC "Kurskrestavratsiya"
5a Theatrical Str., Kursk 305009, Russian Federation

✉ e-mail: babanin_ivan@bk.ru

The purpose of research is development of a concept for building an automated system for the control and management of highly organized insects, namely bee colonies, based on unstructured physically heterogeneous data using artificial neural networks.

Methods. When conducting research and developing a method for constructing an intelligent system for monitoring and managing the life of bee colonies, the methods of multi-criteria analysis and the infological approach were used.

Results. The concept of synthesis of an intelligent information and telecommunication system for monitoring and managing the life of bee colonies with maximum integration into existing regional specialized structural units is proposed, which differs from the existing ones by the possibility of forming an ontology according to specified thematic requests, automated centralized control and management.

Conclusion. The scientific article describes the construction of an intelligent information and telecommunication system based on the tasks necessary for automating technological processes in order to increase the efficiency of performing the functions of beekeeping activities, potential consumers of services provided by the synthesized System.

Keywords: intellectual control and management; beekeeping; infology; receptor-executive environment; peripheral environment.

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

For citation: Babanin I. G., Babanina E. Yu., Bogolyubskaya A. A., Khmelevskaya A. V., Sevryukov A. E., Yudin I. S. The Concept of Building an Intelligent Information and Telecommunication System for Control and Management of the Life Activities of Bee Family. *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*. 2022; 12(2): 8–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-8-26>.

Received 04.04.2022

Accepted 05.05.2022

Published 27.06.2022

Введение

Пчеловодческая деятельность – основа обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации и одна из важных государственных задач. Пчеловодческая деятельность занимает главное место не только в производстве ценных продуктов питания, натуральных медицинских препаратов, но и в развитии семеноводства кормовых трав, в создании возможностей естественного опыления сельскохозяйственных культур [1].

ФГБНУ «Федеральный научный центр пчеловодства» установлено:

- неполноценное опыление приводит к потерям урожаев энтомофильных культур – до 65% гречихи, до 45% эспарцета, до 50 % подсолнечника. Стоимость дополнительного урожая, получаемого от опыления пчелами, в 10 раз и более превышает стоимость прямой продукции пчеловодства;

- для полноценного опыления подсолнечника, гречихи, рапса, горчицы, бахчевых, многолетних трав и других сельскохозяйственных культур необходимо около 7 млн пчелосемей;

- потенциал медоносной базы страны позволяет производить до 300 тыс. т товарного меда.

Согласно данным Росстата:

- количество пчелиных семей в 1990 г. – 4503 тыс.; в 2000 г. – 3457 тыс.; в 2010 г. – 3049 тыс.; в 2020 г. – 3015 тыс.;

- количество произведенного меда в 1990 г. – 46,1 тыс. т.; в 2000 г. –

54,2 тыс. т.; в 2010 г. – 51,5 тыс. т.; в 2020 г. – 66,4 тыс. т.

Сопоставив приведенные выше сведения и данные, получили следующие заключения: наблюдается прогрессирующий дефицит пчел для опыления, производства меда и других продуктов. И как следствие, в такой тенденции возникает недополученная прибыль в сельском хозяйстве.

Решение проблем недостаточного опыления, сниженного потенциала производства товарного меда, дефицита пчел в стране можно осуществить как *социально-экономическими*, так и *научно-техническими* методами.

Социально-экономические методы подразумевают:

- содействие органами государственной власти продвижению продукции пчеловодства, произведенной на территории Российской Федерации как на внутреннем, так и внешнем рынках;

- взаимовыгодную кооперацию между сельскохозяйственными товаропроизводителями, осуществляющими производство продукции растениеводства, и сельскохозяйственными производителями, осуществляющими производство продукции пчеловодства, в целях повышения урожайности сельскохозяйственных культур и увеличения объемов производства продукции пчеловодства;

- выявление и предотвращение случаев массовой гибели пчел;

- осуществление учёта пчёл;

– развитие направления по контролю качества продукции пчеловодческой деятельности, выявлению фальсифицированной, недоброкачественной и контрафактной продукции пчеловодства.

Научно-технические – внедрение современных и перспективных технологий в существующие и вновь создаваемые народные пчеловодческие хозяйства с целью сокращения трудозатрат на различных технологических циклах производства для дальнейшего увеличения пчеловодческого потенциала.

Проблема увеличения пчеловодческого потенциала заключается в том, что на текущий момент используется монофакторный подход к оценке функционального состояния жизнедеятельности пчелиных семей. Данный подход не позволяет провести углубленный анализ физически разнородных данных, формирующих ассоциативно-онтологическое представление.

Кроме того, децентрализация, отсутствие контроля и учета разнородных данных затрудняют формирование объективного представления об объекте наблюдения.

В сложившихся условиях становится актуальной задача повышения информативности о состоянии пчелиных семей, направленной на достижение следующих результатов:

– достоверного контроля текущего состояния пчелиных семей как биологических высокоорганизованных систем;

– формирование за счет комплексирования физически разнородной информации актуальных управляющих воздействий;

– формирование единого информационного поля на основе интеграции данных, полученных от производственных и административных субъектов пчеловодческой деятельности.

Материалы и методы

Учитывая вышеприведенные обстоятельства, синтезируемая инфологическая система информационно-аналитического управления должна обеспечивать повышение эффективности в осуществлении следующих *функций* пчеловодческой деятельности [1]: медово-товарной, разведенческой, опылительной, а качественное функционирование должно достигаться выполнением *задач* по следующим блокам.

• *Блок № 1 «Содержание пчелиных семей»:*

– формирование рекомендаций по расформированию и исправлений неблагополучных семей;

– контроль и управление процессом зимовки пчелиных семей;

– контроль пчелиного воровства, нападения;

– контроль роста пчелиных семей;

– контроль и управление естественным роением;

– контроль процесса искусственного роения.

• *Блок № 2 «Определение кормовых запасов, опыление энтомофильных культур»:*

– определение количеств и качества медовых запасов в ульях;

– оценка медоносной базы на территориях покрытых, непокрытых лесом, сельскохозяйственных угодий;

– определение потребности пчелиной семьи в корме;

– составление медового баланса пасеки;

– дрессировка пчелиных семей на заданные энтомофильные культуры.

• *Блок № 3 «Разведение пчел и селекционно-племенная работа»:*

– определение пород пчел (среднерусская, карпатская, украинская степная, желтая кавказская, бакфаст, итальянская, серая горная кавказская и др.);

– формирование рекомендаций и контроль по скрещиванию пчёл (поглочительное, воспроизводительное, промышленное, улучшающее скрещивания и др.);

– оценка и выбраковка маточников и маток;

– радиообнаружение и учет маток в улье;

– формирование рекомендаций по фенотипическому, генотипическому отбору.

• *Блок № 4 «Профилактические мероприятия по борьбе с болезнями и вредителями пчелиных семей».* Профилактика, выявление и борьба с:

– незаразными болезнями пчёл (белковая и углеводная дистрофия, запаривание, падевый и химический токсикоз и др.);

– бактериальными и вирусными болезнями пчёл (американский и европейский гнилец, парагнилец, мешотчатый расплод, острый и хронический паралич и др.);

– заболеваниями, вызванными простейшими, грибковыми заболеваниями (нозематоз, грегариноз, лептомоноз, криптидиоз, амебиаз, аскофероз, аспергиллез, меланоз, кандидоз и др.);

– паразитами пчёл (нитчатый червь, акарапис, варроатоз, браула, муха сеноптаиния, пчелиная горбунья, триунгулина и др.);

– беспозвоночными животными (бумажные осы, шершни, филант, муравьи, стрекозы, восковая моль, бабочка мертвая голова, ухвертка, пауки и др.);

– позвоночными животными (лягушки, ящерицы, пчелоеды, синицы, хомяки, ежи, медведи и др.).

Услугами, формируемыми разрабатываемой интеллектуальной системы по контролю и управлению жизнедеятельностью пчелиных семей, целесообразно обеспечить:

1. Государственные учреждения:

– научно-исследовательские институты, высшие, средние специальные учебные заведения, организации дополнительного образования;

– комитеты сельского хозяйства, экологической безопасности и природопользования, лесного хозяйства, экономики и развития региона и другие;
– ветеринарные клиники;
– санитарно-эпидемиологические службы.

2. Крестьянско-фермерские и личные подсобные хозяйства:

– пчеловодческие хозяйства;
– овощеводческие, садоводческие, растениеводческие хозяйства.

3. Акционерные общества, индивидуальные предпринимательства:

– производства и сбыта пищевой продукции;

– производства и сбыта медицинских препаратов;

– производства и сбыта восковой продукции.

Так, исходя из задач, выполняемых системой, и потребителей услуг пчеловодческой деятельности на рисунке 1 показана структурно-функциональная схема системы интеллектуального контроля и управления [2; 3].

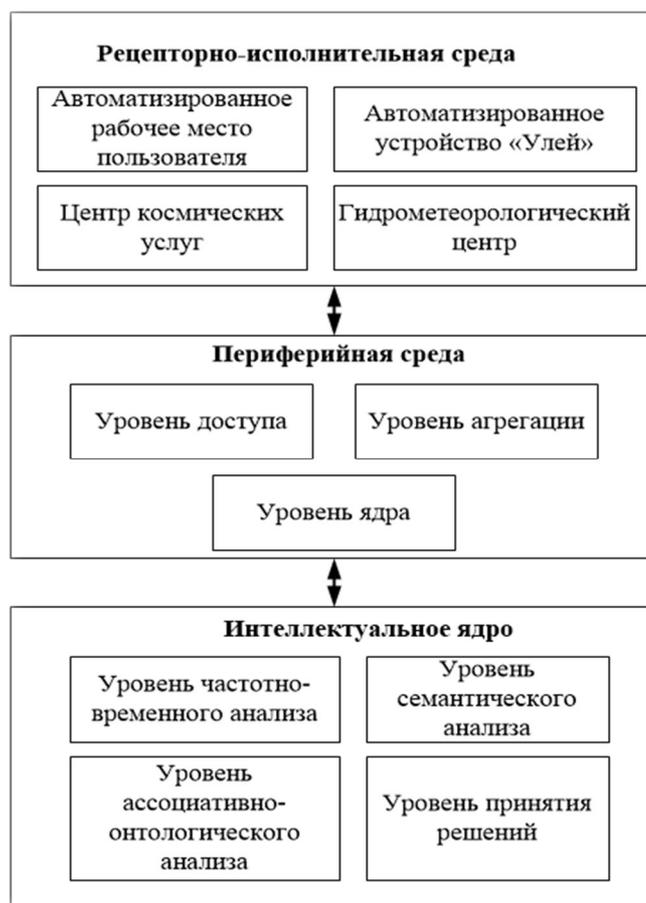


Рис. 1. Структурно-функциональная схема интеллектуальной системы по контролю и управлению жизнедеятельностью пчел

Fig. 1. Structural and functional diagram of an intelligent system for monitoring and managing the vital activity of bees

В состав *автоматизированного устройства «Улей»* входят: сенсоры С-1 ... С-N, микроконтроллер МК, актуаторы А-1 ... А-M, приемо-передающее дистанционное устройство ППДУ, антенна А. Сенсоры С-1 ... С-N, актуаторы А-1 ... А-M, соединенные с микроконтроллером МК, который в свою очередь соединен с ППДУ по UART-интерфейсу¹. В качестве сенсоров использованы датчики температуры, влажности, веса улья, уровня жидкости, распределения температурного поля, радиолокатора обнаружения плодной матки, микрофон,

фотовидеокамера и др. Актуаторы – системы биологической обработки, управления задвижкой летка, подогрева, пополнения поилки, управления кормушкой и др. Взаимодействие рецепторно-исполнительной среды РИС с периферийной средой осуществляется через широкополосную антенну А, которая подключена к ППДУ. На рисунке 2 отображена модель построения автоматизированного устройства «Улей» инфологической системы информационно-аналитического управления пчеловодческими хозяйствами (ПХ).

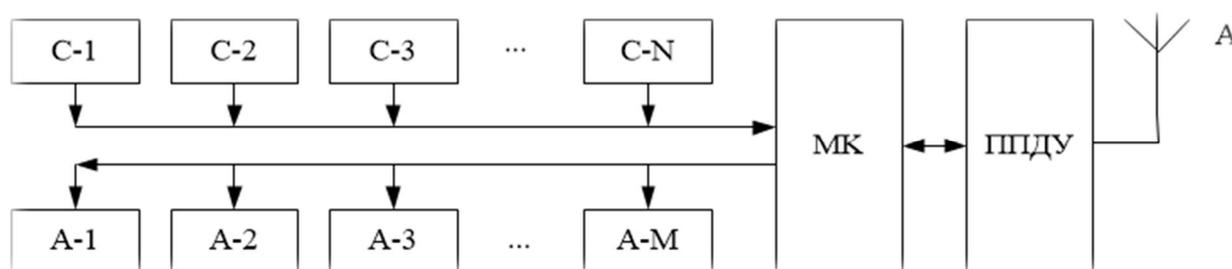


Рис. 2. Модель построения автоматизированного устройства «Улей»

Fig. 2. A model of building an automated device "Beehive"

Включение в структуру предлагаемой системы интеллектуального контроля и управления жизнедеятельностью пчелиных семей специализированного центра – областного *Центра космических услуг (ЦКУ)* – обеспечивает централизованный сбор, обработку, использование и хранение разнородных пространственных данных.

ЦКУ предназначен для формирования совокупного регионального геоинформационного ресурса, предоставления космических и геоинформационных продуктов и услуг широкому кругу потребителей, обеспечения поддержки принятия управленческих решений и использования результатов космической

¹ Бабанин И. Г. Процедура проектирования фильтров частотной селекции с учетом эквивалентных энергетических потерь в радио-

приемных устройствах высокоскоростных радиосистем передачи информации: дис. ... канд. тех. наук. Курск, 2018. 166 с.

деятельности (РКД) на основе передовых инфокоммуникационных и навигационных технологий.

ЦКУ обеспечивает взаимодействие с органами государственной власти

(ОГВ), местного самоуправления (ОМСУ). На рисунке 3 представлена модель информационного обмена между ЦКУ и ОГВ, ОМСУ.

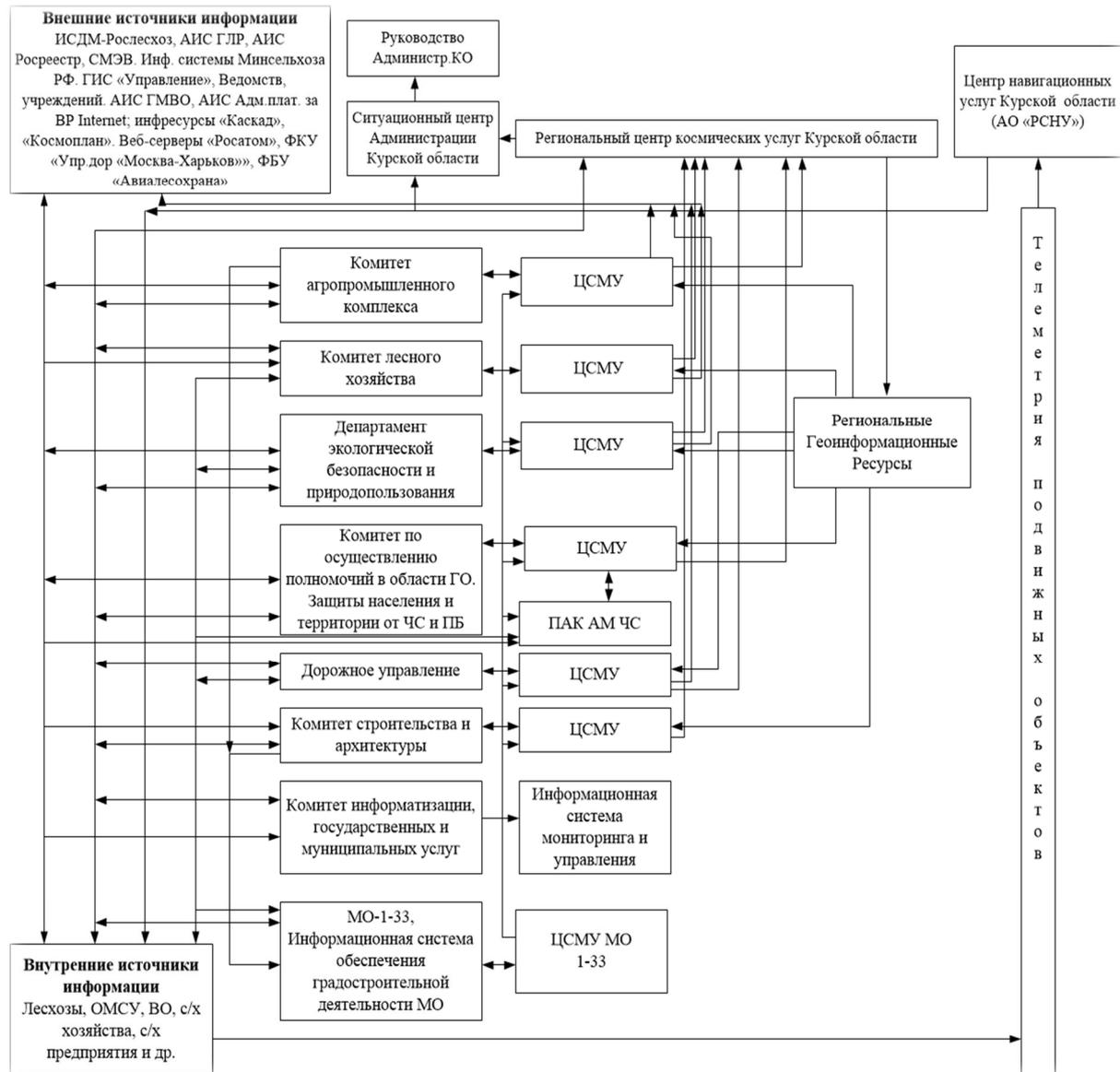


Рис. 3. Модель информационного взаимодействия ЦКУ, ОГВ, ОМСУ

Fig. 3. The model of information interaction of the CCU, OGV, OMSU

В состав модели использования РКД ОГВ, ОМСУ Курской области входят следующие основные элементы [4; 5; 6]:

– внешние источники информации, к которым можно отнести центры в России следующих информационных си-

стем и ресурсов: информационная система дистанционного мониторинга «ИСДМ-Рослесхоз», автоматизированная информационная система государственного реестра леса (АИС ГЛР), автоматизированная информационная система АИС ГМВО, сеть общего пользования «INTERNET»; информационные системы Росреестра, Минсельхоза РФ, ведомств, учреждений; информационные ресурсы «Каскад», «Космоплан»; государственная корпорация «Росатом»; ФКУ «Упрдор «Москва-Харьков»»; ФБУ «Авиалесохрана»;

– внутренние источники – лесхозы, органы местного самоуправления, сельскохозяйственные хозяйства, сельскохозяйственные предприятия и другие;

– 33 муниципальных образования (МО), из них 28 районов Курской области, города Курск, Железногорск, Льгов, Курчатов, Щигры;

– комитеты, управления, департаменты администрации;

– центр космических услуг Курской области;

– центр навигационных услуг Курской области (АО «РСНУ»);

– ситуационный центр администрации Курской области.

Так, наиболее информативными данными, сведениями и информацией для контроля и управления жизнедеятельностью пчелиных семей, предоставляемыми ЦКУ, являются:

– топокарты на территории Курской области (масштабы: 1:2000, 1:5000, 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000,

1:200 000, 1:1 000 000) и схемы на территории сельскохозяйственных угодий (1: 500);

– материалы ДЗЗ земель сельскохозяйственного назначения по оценке посевных площадей по типам сельскохозяйственных культур, по контролю метеоусловий, по контролю чрезвычайных ситуаций и оценка их последствий с решением до 2,5 м;

– материалы аэрофотосъемки;

– базы данных объектов сельскохозяйственной и иной деятельности;

– схемы с отображением сельскохозяйственных культур и фактического производства продукции растениеводства по участкам, полям, хозяйствам (холдингу), району.

Гидрометеорологический центр ГМЦ на основе данных, полученных с космических спутников, радиозондов, самолетов, метеорадаров, метеостанций и людей, подтверждающих или опровергающих то, что видят в мобильных приложениях, обеспечивает *центр пчеловодческих услуг ЦПУ* необходимой информацией для дальнейших расчетов [7].

Автоматизированные рабочие места (АРМ) пользователя обеспечивают формирование запросов и отображение информации в соответствии с предоставленным правом доступа ЦПУ.

Периферийная среда ПС информационно-телекоммуникационной системы состоит из уровней доступа, агрегации, ядра. На рисунке 4 представлена модель построения периферийной среды

инфологической системы информационно-аналитического управления пчеловодческими хозяйствами.

На уровне доступа периферийной среды (ПС) обеспечивается выполнение следующих задач:

- 1) передача данных с воздействием электромагнитного излучения на биологические формы на уровне естественного фона;
- 2) отказоустойчивость передачи данных в пределах одного ПХ.

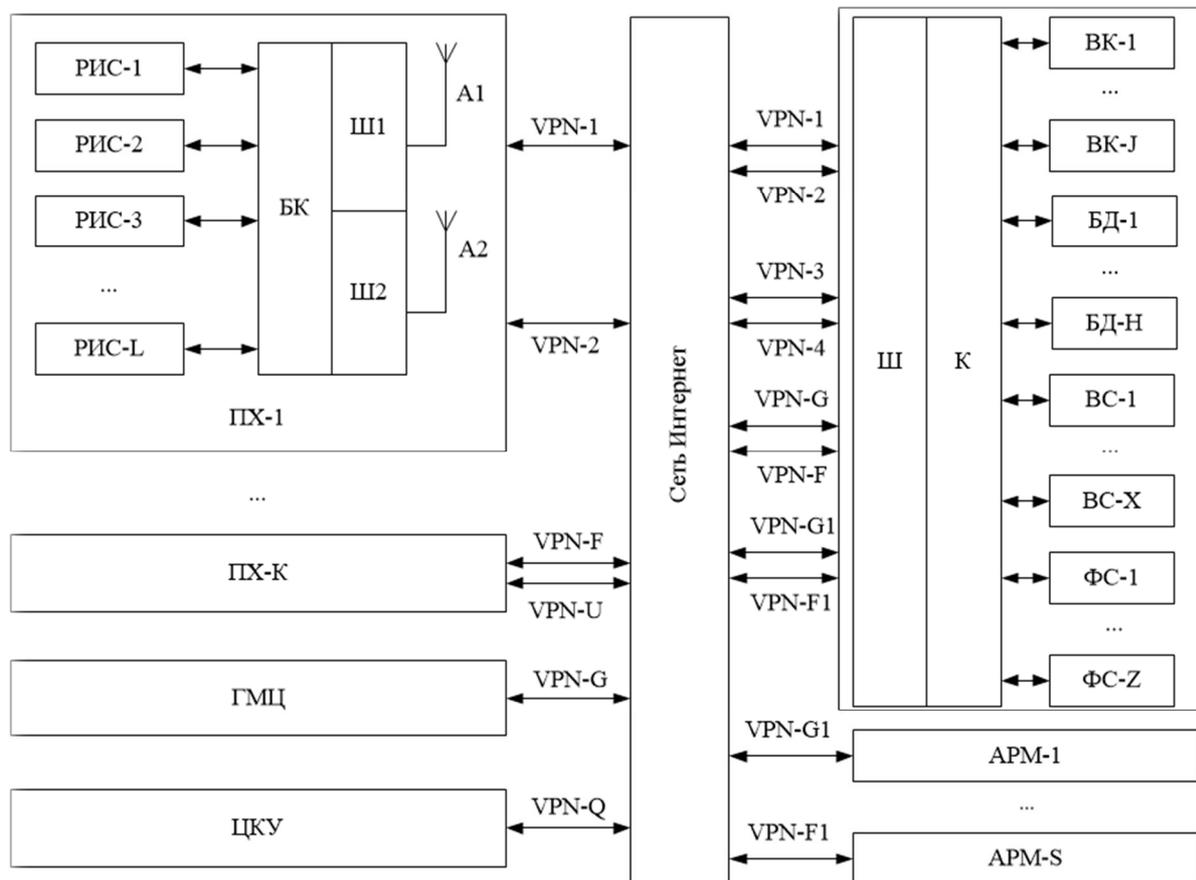


Рис. 4. Модель построения периферийной среды информационно-телекоммуникационной системы

Fig. 4. A model for building a peripheral environment of an information and telecommunications system

Достижение вышеставленных задач достигнуто применением сигналов с базой сигнала $B \gg 1$ и внедрением технологии FrameRelay. Сеть уровня доступа ПС выполнена по топологии «звезда»: РИС-1 ... РИС-L соединены с беспроводным коммутатором (БК) посредством организации постоянных вир-

туальных каналов (Permanent Virtual Circuits, PVC). БК соединен посредством SPI-интерфейсов со шлюзами Ш1 и Ш2, которые обеспечивают передачу данных на уровне агрегации ПС.

На уровне агрегации ПС обеспечивается передача данных с удаленных ПХ, автоматизированных рабочих мест

(АРМ), ЦКУ, ГМЦ до интеллектуального ядра (Я), расположенного в ЦПУ. Обмен данными с ПХ осуществляется через антенные устройства А1 и А2 по каналам сотовой связи 4G/5G и/или спутниковой связи VSAT. Спутниковый канал связи организован в Ku/Ка-диапазоне в зависимости от размещения кочевых/стационарных ПХ и зоны покрытия того или иного искусственного спутника Земли. Передача разнородного трафика организована через глобальную сеть Интернет. Передача данных с АРМ обеспечивается через пользовательское подключение к сети Интернет. В задачах обеспечения безопасности передаваемого трафика внутри физических каналов организованы виртуальные каналы VPN с использованием протокола OpenVPN или других [8].

Уровень ядра ПС обеспечивает обмен данными между вычислительными

кластерами (ВК), базами данных (БД), веб-серверами (ВС), файловыми серверами (ФС), шлюзом (Ш) через коммутатор (К), построенный в соответствии с рекомендациями обеспечения высокоскоростного доступа к сети 40 GbEthernet.

Интеллектуальное ядро включает вычислительные кластеры ВК, базы данных БД, Ш, веб-серверы ВС, ФС, К, находящиеся в ЦПУ.

На рисунке 5 изображена логическая схема работы интеллектуального ядра инфологической системы информационно-аналитического управления пчеловодческой деятельностью. В основе работы ядра лежит трехуровневая модель, состоящая из частотно-временного, семантического и ассоциативно-онтологического уровней [2; 9; 10; 11; 12].



Рис. 5. Логическая схема работы интеллектуального ядра информационно-телекоммуникационной системы

Fig. 5. The logical scheme of the intelligent core of the information and telecommunication system

На первом уровне (частотно-временном) исходные сигналы обрабатываются ВК, в процессе обработки получают одномерные и двумерные массивы с наиболее информативными данными об исследуемом объекте [13; 14].

В качестве решаемых задач частотно-временного анализа выделяются следующие: выделение компонент; изменение размеров анализируемых фрагментов (масштабирование); выделение контуров фрагментов изображений; комплексирование изображений, получаемых в различных диапазонах длин волн [13; 14].

На втором уровне (семантическом) происходит выделение смысловых единиц по заданным тематическим кластерам. В результате анализа формируется семантическое окружение с запрашиваемыми пользователем данными об исследуемом объекте по одному информационному источнику [13; 14].

На ассоциативно-онтологическом уровне формируется представление о запрашиваемом объекте по заданной тематике на основе совокупности физически разнородных информационных источников [13; 14; 15; 16]. Результаты работы данного уровня позволяют сформировать управляющие сигналы на актуаторы, которые воздействуют на процесс жизнедеятельности пчелиных семей.

В качестве алгоритмов и методов обработки информации используются нейросетевые технологии.

Результаты и их обсуждение

Из предыдущего уровня техники известны наиболее близкие системы и устройства по технической сущности:

1. Устройство диагностики состояний пчелиных семей по их акустическому шуму, представленное в патенте RU № 2463783 С2 [17].

2. Автоматизированная система для контроля состояний пчелиных семей по распределению тепловых полей в улье, представленная в патенте RU № 2008116932 А [18].

3. Автоматизированная информационно-измерительная система контроля за жизнедеятельностью пчелиных семей и процессом сбора меда, представленная в патенте RU № 2484622 С2 [19].

4. Автоматизированная система стабилизации микроклимата пчелиных семей, представленная в патенте RU № 113596 U1 [20].

5. Автоматизированная система кормления пчел на пасеке в осенне-весенний период, представленная в патенте RU № 2728635 С1 [21].

Недостатками указанных систем являются отсутствие возможности формирования онтологии по заданным тематическим запросам, автоматизированного централизованного контроля и управления пчеловодческими хозяйствами в пределах региона.

Предложенная же концепция позволит проведение дистанционного автоматизированного анализа физически разнородных неструктурированных информационных источников или анализа по

тематическому запросу, сформированному пользователем системы, с целью контроля с последующим обоснованным управлением жизнедеятельностью высокоорганизованных насекомых через исполняющие устройства в ульях или техника-пчеловода.

Выводы

В работе представлены базовые принципы построения централизован-

ной автоматизированной системы по контролю и управлению жизнедеятельности пчелиных семей на основе искусственных нейронных сетей и машинного обучения физически разнородными неструктурированными данными, сведениями, информацией, а также проведен анализ необходимых источников, предоставляемых ими типов данных, мест интеграции для полного функционирования предложенной системы.

Список литературы

1. Кашковский В. Г. Содержание и разведение медоносных пчел *Apis Mellifera* L. Изд. 8-е, доп. и испр. СПб.: ИП Поспелов М. Б., 2021. 424 с.
2. Михайлов С. Н., Кулешов С. В. Экспертный мониторинг неструктурированных информационных ресурсов в интересах информационно-аналитического обеспечения космических исследований // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 6 (51), ч. 2. С. 40–43.
3. Бабанин И. Г., Боголюбская А. А. Концептуальная модель информационно-телекоммуникационной системы аналитического анализа неструктурированных физически разнородных данных в задачах контроля и управления жизнедеятельностью пчелиных семей // Актуальные проблемы современной науки и производства: материалы VI Всероссийской научно-технической конференции. Рязань: ИП Коняхин Александр Викторович, 2021. С. 142–150.
4. Севрюков А. Е., Хмелевская А. В., Демьяненко В. Ю. Особенности оценки социально-экономической эффективности использования РКД в регионах с многопрофильным экономическим укладом // Телекоммуникации. 2019. № 1. С. 43–48.
5. Севрюков А. Е., Хмелевская А. В. Обобщенная схема системы комплексного использования результатов космической деятельности в интересах социально-экономического развития региона // Телекоммуникации. 2019. № 5. С. 35–39.
6. Севрюков А. Е., Михайлов С. Н., Хмелевская А. В. Структурно-функциональная организация системы комплексного использования результатов космической деятельности в интересах социально-экономического развития региона // Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2017: материалы XII Международной научно-технической конференции: в 2 т. / Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. Владимир, 2017. С. 70–72.

7. Бабанин И. Г., Петрова Е. С., Полушкина К. В. Система сбора гидрометеорологических показаний с последующей передачей по беспроводному каналу в целях корректировки метеорологической обстановки в регионе // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: материалы V Всероссийской научно-практической конференции / под ред. В. Г. Андропова; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2021. С. 17–23.

8. Хмелевская А. В., Аксентьев А. А. Показатели качества обслуживания VPN // Инфокоммуникации и информационная безопасность: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам III Всероссийской научно-практической конференции: в 2 ч. / отв. ред. В. Г. Андронов; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2016. С. 293–297.

9. Бабанин И. Г., Севрюков А. Е., Хмелевская А. В. Метод идентификации заболевания пчелиных семей варроатозом с использованием ассоциативно-онтологического анализа инфологической системой информационно-аналитического управления пчеловодческими хозяйствами // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 14, № 4. С. 180–195.

10. Дворкович В. П., Дворкович А. В. Цифровые видеoinформационные системы (теория и практика). М.: Техносфера, 2012. 1008 с.

11. The analysis of cybersecurity problems in distributed infocommunication networks based on the active data conception / S. V. Kuleshov, A. Y. Aksenov, I. I. Viksnin, E. O. Laskus, V. V. Belyaev // Lecture Notes in Networks and Systems. 2020. Vol. 95. P. 491–499.

12. Kuleshov S. V., Zaytseva A. A., Aksenov A. J. The tool for the innovation activity ontology creation and visualization // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 763. P. 292–301.

13. Исследование и разработка научно-технических путей создания инфологической системы информационно-аналитического обеспечения научных исследований / С. Н. Михайлов, С. В. Кулешов, О. Е. Ключникова, А. В. Хмелевская / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2018. 111 с.

14. Михайлов С. Н., Потапенко А. М., Хмелевская А. В. Применение информационно-телекоммуникационной системы аналитического мониторинга данных в неструктурированных информационных ресурсах // Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2017: материалы XII Международной научно-технической конференции: в 2 т. / Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. Владимир, 2017. С. 67–69.

15. Томакова Р. А., Шаталова О. В., Томаков М. В. Теоретико-множественный подход и теория графов в обработке сложноструктурируемых изображений: монография / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2012. 117 с.

16. Потапенко А. М., Хмелевская А. В., Русанов Р. Н. Общая постановка задачи организации поиска неформализованной информации в общедоступных информационных ресурсах // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций: материалы III Региональной научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2011. С. 28–33.

17. Пат. 2463783 С2 Российская Федерация. Устройство диагностики состояний пчелиных семей по их акустическому шуму / Рыбочкин А. Ф., Романов А. А., Яковлев А. И. № 2010138254/13; заявл. 15.09.10; опубл. 20.10.12, Бюл. № 29.

18. Пат. 2008116932 А Российская Федерация. Автоматизированная система для контроля состояний пчелиных семей по распределению тепловых полей в улье / Рыбочкин А. Ф., Дрёмов Б. Б., Захаров И. С. № 2081169362/12; заявл. 28.04.08; опубл. 10.11.09, Бюл. № 1.

19. Пат. 2484622 С2 Российская Федерация. Автоматизированная информационно-измерительная система контроля за жизнедеятельностью пчелиных семей и процессом сбора меда / Кашманов И. А. № 2011128336/13; заявл. 08.07.11; опубл. 20.06.13, Бюл. № 17.

20. Пат. 113596 U1 Российская Федерация. Автоматизированная система стабилизации микроклимата пчелиных семей / Кунгурцев С. А., Соловьев В. И., Белоус М. В. Опубл. 20.02.12, Бюл. № 5.

21. Пат. 2728635 С1 Российская Федерация. Автоматизированная система кормления пчел на пасеке в осенне-весенний период / Николаенко С. А., Цокур Д. С., Цокур Е. С., Зверев И. В., Храпов В. А. № 2019131016; заявл. 30.09.19; опубл. 30.07.20, Бюл. № 22.

References

1. Kashkovsky V. G. Soderzhanie i razvedenie medonosnykh pchel ApisMelliferaL [Maintenance and breeding of honey bees ApisMelliferaL]. 8th ed. St. Petersburg, IP Pospelov M. V. Publ., 2021. 424 p.

2. Mikhailov S. N., Kuleshov S. V. Ekspertnyi monitoring nestrukturirovannykh informatsionnykh resursov v interesakh informatsionno-analiticheskogo obespecheniya kosmicheskikh issledovaniy [Expert monitoring of unstructured information resources in the interests of information and analytical support for space research]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2013, no. 6 (51), pt. 2, pp. 40–43.

3. Babanin I. G., Bogolyubskaya A. A. [Conceptual model of the information and telecommunication system of analytical analysis of unstructured physically heterogeneous data in the tasks of monitoring and managing the vital activity of bee families]. *Aktual'nye problemy*

sovremennoi nauki i proizvodstva. Materialy VI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii [Actual problems of modern science and production. Materials of the VI All-Russian Scientific and Technical Conference]. Ryazan, IP Konyakhin Aleksandr Viktorovich Publ., 2021, pp. 142–150. (In Russ.)

4. Sevryukov A. E., Khmelevskaya A. V., Demyanenko V. Y. Osobennosti otsenki sotsial'no-ekonomicheskoi effektivnosti ispol'zovaniya RKD v regionakh s mnogoprofil'nym ekonomicheskim ukladom [Features of assessing the socio-economic efficiency of the use of RKD in regions with a multidisciplinary economic structure]. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2019, no. 1, pp. 43–48.

5. Sevryukov A. E., Khmelevskaya A. V. Obobshchennaya skhema sistemy kompleksnogo ispol'zovaniya rezul'tatov kosmicheskoi deyatel'nosti v interesakh sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya regiona [Generalized scheme of the system of integrated use of the results of space activities in the interests of socio-economic development of the region]. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2019, no. 5, pp. 35–39.

6. Sevryukov A. E., Mikhailov S. N., Khmelevskaya A. V. [Structural and functional organization of the system of integrated use of the results of space activities in the interests of socio-economic development of the region]. *Perspektivnye tekhnologii v sredstvakh peredachi informatsii – PTSPI-2017. Materialy XII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Promising technologies in the media of information transmission – PTSPI-2017. Materials of the 12th International Scientific and Technical Conference]. Vladimir, Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov Publ., 2017, pp. 70–72. (In Russ.)

7. Babanin I. G., Petrova E. S., Polushkina K. V. [The system of collecting hydrometeorological readings with subsequent wireless transmission in order to adjust the meteorological situation in the region]. *Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Materialy V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Infocommunications and space technologies: state, problems and solutions. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference]; ed. by I. G. Andronov. Kursk, Southwest State University Publ., 2021, pp. 17–23. (In Russ.)

8. Khmelevskaya A. V., Aksentyev A. A. [VPN service quality indicators]. *Infokommunikatsii i informatsionnaya bezopasnost': sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei po materialam III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Infocommunications and information security: state, problems and solutions. Collection of scientific articles based on the materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference]; ed. by V. G. Andronov. Kursk, Southwest State University Publ., 2016, pp. 293–297. (In Russ.)

9. Babanin I. G., Sevryukov A. E., Khmelevskaya A. V. Metod identifikatsii zabolevaniya pchelinykh semei varroatozom s ispol'zovaniem assotsiativno-ontologicheskogo analiza infologicheskoi sistemoi informatsionno-analiticheskogo upravleniya pchelovodcheskimi khozyaistvami [Method of identifying the disease of bee colonies with varroatosis using associative-ontological analysis by the infological system of information and analytical management of beekeeping farms]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2021, vol. 14, no. 4, pp. 180–195.

10. Dvorkovich V. P., Dvorkovich A. V. Tsifrovye videoinformatsionnye sistemy (teoriya i praktika) [Digital video information systems (theory and practice)]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2012. 1008 p.

11. Kuleshov S. V., Aksenov A. Y., Viksnin I. I., Laskus E. O., Belyaev V. V. The analysis of cybersecurity problems in distributed infocommunication networks based on the active data conception. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2020, vol. 95, pp. 491–499.

12. Kuleshov S. V., Zaytseva A. A., Aksenov A. J. The tool for the innovation activity ontology creation and visualization. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, vol. 763, pp. 292–301.

13. Mikhailov S. N., Kuleshov S. V., Klyuchnikova O. E., Khmelevskaya A. V. Issledovanie i razrabotka nauchno-tekhnicheskikh putei sozdaniya infologicheskoi sistemy informatsionno-analiticheskogo obespecheniya Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet nauchnykh issledovaniy [Research and development of scientific and technical ways to create an infological system of information and analytical support for scientific research]. Kursk, Southwest State University Publ., 2018. 111 p.

14. Mikhailov S. N., Potapenko A. M., Khmelevskaya A. V. [Application of information and telecommunication system of analytical data monitoring in unstructured information resources]. *Perspektivnye tekhnologii v sredstvakh peredachi informatsii – PTSPI-2017. Materialy XII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Promising technologies in the media of information transmission – PTSPI-2017. Materials of the 12th International Scientific and Technical Conference]. Vladimir, Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov Publ., 2017, pp. 67–69. (In Russ.)

15. Tomakova R. A., Shatalova O. V., Tomakov M. V. Teoretiko-mnozhestvennyi podkhod i teoriya grafov v obrabotke slozhnostrukturiruemyykh izobrazheniy [Set-theoretic approach and graph theory in the processing of complex structured images]. Kursk, Southwest State University Publ., 2012. 117 p.

16. Potapenko A. M., Khmelevskaya A. V., Rusanov R. N. [General statement of the task of organizing the search for unformalized information in publicly available information resources]. *Aktual'nye problemy infotelekkommunikatsii. Materialy III Regional'noi nauchno-*

prakticheskoi konferentsii [Actual problems of infotelecommunications. Materials of the III Regional scientific and Practical Conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2011, pp. 28–33. (In Russ.)

17. Rybochkin A. F., Romanov A. A., Yakovlev A. I. Ustroistvo diagnostiki sostoyanii pchelinykh semei po ikh akusticheskomu shumy [Device for diagnosing the conditions of bee colonies by their acoustic noise]. Patent RF, no. 2463783 C2, 2012.

18. Rybochkin A. F., Dremov B. B., Zakharov I. S. Avtomatizirovannaya sistema dlya kontrolya sostoyanii pchelinykh semei po raspredeleniyu teplovykh polei v ul'e [Automated system for monitoring the state of the bee family according to the distribution of thermal fields in the hive]. Patent RF, no. 2008116932 A, 2009.

19. Kashmanov I. A. Avtomatizirovannaya informatsionno-izmeritel'naya Sistema kontrolya za zhiznedeятel'nost'yu pchelinykh semei i protsessom sbora meda [Automated information and measuring systemacontrolyase of the vital activity of bees and the honey collection process]. Patent RF, no. 2484622 C2, 2013.

20. Kungurtsev S. A., Soloviev V. I., Belous M. V. Avtomatizirovannaya sistema stabilizatsii mikroklimata pchelinykh semei [Automated system for stabilizing the microclimate of bee colonies]. Patent RF, no. 113596 U1, 2012.

21. Nikolaenko S. A., Tsokur D. S., Tsokur E. S., Zverev I. V., Khrapov V. A. Avtomatizirovannaya sistema kormleniya pchel na paseke v osenne-vesennii period [Automated feeding system for bees in the apiary in the autumn-spring period]. Patent RF, no. 2728635 C1, 2020.

Информация об авторах / Information about the Authors

Бабанин Иван Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: babanin_ivan@bk.ru

Ivan G. Babanin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: babanin_ivan@bk.ru

Бабанина Екатерина Юрьевна, инженер производственно-технического отдела, ООО «Курскреставрация», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: babanina@internet.ru

Ekaterina Yu. Babanina, Engineer of the Production and Technical Department, Kurskrestavratiya LLC, Kursk, Russian Federation, e-mail: babanina@internet.ru

Боголюбская Анастасия Александровна, студентка кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: babanin-ivan@bk.ru

Anastasia A. Bogolyubskaya, Student of the Department of Information Security, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: babanin-ivan@bk.ru

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

Alena V. Khmelevskaya, Senior Lecturer of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: aquarel85@mail.ru

Севрюков Александр Евгеньевич, доцент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alsevryukov@yandex.ru

Aleksandr E. Sevryukov, Associate Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: alsevryukov@yandex.ru

Юдин Илья Сергеевич, студент кафедры конституционного права, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: angry_bender @ mail.ru

Ilya S. Yudin, Student of the Department of Constitutional Law, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: angry_bender @ mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-27-39>

Разработка автоматизированной системы для информационного обеспечения природоохранной деятельности в регионе

А. В. Иорданова¹ ✉, И. О. Кирильчук¹, А. Е. Семенова¹

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

✉ e-mail: asy.gnezdilova@yandex.ru

Резюме

Цель исследования заключается в обеспечении потребностей юридических и физических лиц в достоверной информации о состоянии окружающей среды в регионе посредством создания автоматизированной системы для информационного обеспечения природоохранной деятельности.

Методы. Рассматривая практику применения программного обеспечения в природоохранной деятельности, можно выделить следующие основные его группы: информационно-правовые системы; программы для оценки негативного воздействия на окружающую природную среду; программные продукты для обработки данных аналитических лабораторий, осуществляющих экологический контроль; программное обеспечение для автоматизации процесса подготовки статистических отчетов в области природоохранной деятельности; территориальные программные комплексы; электронные карты природоохранной направленности. Автоматизированные информационные системы, как правило, включают в себя совокупность некоторых перечисленных выше программных продуктов. Процесс сбора и накопления информации в разрабатываемой системе должен базироваться на единой нормативно-справочной информации, преобразованной для работы с ней в электронном виде. Работа базы данных рассматриваемой системы осуществляется по схеме «клиент-сервер».

Результаты. Разрабатываемая автоматизированная система для информационного обеспечения природоохранной деятельности состоит из шести модулей: отходы; воздух; вода; почва; растения; животные. Все модули, в свою очередь, подразделяются на определенные блоки: справочно-информационный блок; отчеты; мониторинг. В справочно-информационном блоке содержатся общие сведения о рассматриваемом объекте, статистические данные и другая справочная информация. Блок «Отчеты» включает в себя типовые формы отчетной документации по определённому модулю, а также рекомендации по заполнению форм рассматриваемых отчетов. Блок «Мониторинг» содержит информацию, получаемую посредством системы постоянного наблюдения за явлениями и процессами, проходящими в окружающей среде с определённым объектом.

Заключение. Информация, накопленная в разрабатываемой системе, может использоваться для осуществления оперативного экологического контроля, оценки антропогенной нагрузки на территорию, а также принятия управленческих решений в области охраны окружающей среды, внедрения малоотходных и экологически чистых технологий.

Ключевые слова: автоматизированная информационная система; мониторинг; окружающая среда; природоохранная деятельность.

© Иорданова А. В., Кирильчук И. О., Семенова А. Е., 2022

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

Для цитирования: Иорданова А. В., Кирилчук И. О., Семенова А. Е. Разработка автоматизированной системы для информационного обеспечения природоохранной деятельности в регионе // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 2. С. 27–39. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-27-39>.

Поступила в редакцию 29.03.2022

Подписана в печать 25.04.2022

Опубликована 27.06.2022

Development of an Automated System for Information Support of Environmental Protection Activities in the Region

Anastasiya V. Iordanova¹ ✉, Iraida O. Kirilchuk¹,
Anastasiya E. Semenova¹

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

✉ e-mail: asy.gnezdilova@yandex.ru

Abstract

The purpose of research is to meet the needs of legal entities and individuals in reliable information about the state of the environment in the region by creating an automated system for information support of environmental protection activities.

Methods. Considering the practice of using software in environmental protection, the following main groups can be distinguished: information and legal systems; programs for assessing the negative impact on the environment; software products for processing data from analytical laboratories performing environmental control; software for automating the process of preparing statistical reports in the field of environmental protection; territorial software complexes; electronic maps of environmental orientation. Automated information systems, as a rule, include a set of some of the software products listed above. The process of collecting and accumulating information in the system being developed should be based on a single standard reference information converted to work with it in electronic form. The operation of the database of the system in question is carried out according to the client-server scheme.

Results. The automated system being developed for environmental information support consists of six modules: waste; air; water; soil; plants; animals. All modules, in turn, are divided into certain blocks: reference and information block; reports; monitoring. The reference and information block contains general information about the object under consideration, statistical data and other reference information. The reports block includes standard forms of reporting documentation for a specific module, as well as recommendations for filling out the forms of the reports under consideration. The monitoring block contains information obtained through a system of constant monitoring of phenomena and processes occurring in the environment with the object in question.

Conclusion. The information accumulated in the system under development can be used to carry out operational environmental control, assess the anthropogenic load on the territory, as well as make management decisions in the field of environmental protection, the introduction of low-waste and environmentally friendly technologies.

Keywords: automated information system; monitoring; environment; environmental protection activities.

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

For citation: Iordanova A. V., Kirilchuk I. O., Semenova A. E. Development of an Automated System for Information Support of Environmental Protection Activities in the Region. *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*. 2022; 12(2): 27–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-27-39>.

Received 29.03.2022

Accepted 25.04.2022

Published 27.06.2022

Введение

В настоящее время одним из приоритетных направлений обеспечения природоохранной деятельности является экологический контроль и мониторинг, определяемый как комплекс мер, направленных на предотвращение нарушений в области охраны окружающей среды, а также соблюдение нормативных требований. В связи с этим возникает необходимость в систематическом сборе, накоплении и оценке информации, касающейся взаимодействия человека и компонентов природной среды [1; 2; 3].

Кроме того, на текущий момент у физических лиц существует проблема получения оперативной и достоверной информации о состоянии окружающей природной среды на территории их проживания.

Для решения обозначенных проблем можно использовать автоматизированные информационные системы (АИС). АИС применяются в различных сферах деятельности и позволяют сократить трудозатраты, а также избежать повторов и ошибок в процессе сбора, накопления и обработки различной информации [4; 5; 6; 7].

Материалы и методы

Рассматривая практику применения программного обеспечения в природоохранной деятельности, можно выделить следующие основные его группы [8; 9; 10; 11; 12; 13]:

- информационно-правовые системы, позволяющие пользователям изучать нормативно-правовые акты в сфере экологии и природопользования;

- программы для оценки негативного воздействия на окружающую природную среду;

- программные продукты для обработки данных аналитических лабораторий, осуществляющих экологический контроль, и формирования их отчетов;

- программное обеспечение для автоматизации процесса подготовки статистических отчетов в области природоохранной деятельности различных предприятий;

- территориальные программные комплексы, которые предназначены для региональных природоохранных органов с целью минимизации трудозатрат по внесению информации квартальной и годовой отчетности, разрешительной документации, а также анализа поступления платежей за загрязнение природной среды;

– электронные карты природоохранной направленности.

Деление на данные группы в большинстве случаев является условным ввиду того, что некоторые программные комплексы включают в себя сразу несколько описанных ранее групп. Однако для полноценной оценки текущего состояния программного обеспечения природоохранной деятельности рассмотрим каждую из представленных групп подробнее.

Среди информационно-правовых систем следует выделить такие популярные системы, как «КонсультантПлюс» и «Гарант». Однако при использовании данных ресурсов в качестве инструментов для отслеживания изменений природоохранного законодательства пользователи сталкиваются с определенными трудностями: в частности, с проблемой отделить документ или статью, касающуюся экологии от «общих» документов.

Программы для оценки негативного воздействия на окружающую природную среду фактически представляют собой переведенные в электронный вид утвержденные законодательно методики оценки негативного воздействия. Наибольшую популярность такие программы получили у проектных организаций. Самым ярким представителем данной группы является программный комплекс «Эколог», предназначенный для автоматизированного расчета рассеивания выбросов от стационарных источников.

Программные продукты для обработки данных и формирования отчетов аналитических лабораторий, осуществляющих экологический контроль, являются узконаправленными продуктами. Главной целью данных программ является автоматизация работы лабораторий: ведение электронных журналов, метрологическая обработка результатов измерений, автоматизированный документооборот и т. п. Наиболее перспективной разработкой в данной группе ПО является программа «Эколаборатория».

Самыми широко распространёнными программными продуктами являются программы для автоматизированного формирования статистических отчетов в области природоохранной деятельности предприятий. Наиболее крупные промышленные предприятия, как правило, пользуются своими же разработками, остальные используют стороннее ПО. Особенностью данного типа программных продуктов является то, что разработчикам необходимо постоянно следить за изменениями в утвержденных формах экологической отчетности, в которые довольно часто вносятся правки.

Территориальные программные комплексы, как правило, представляют собой совокупность программ, объединённых в единую систему, позволяющую сотрудникам экологических служб региона автоматизировать процесс анализа информации по различным экологическим вопросам. В данной группе

можно отметить информационно-экологическую систему «Интегрированный банк данных природоохранной информации Пермского края». Данная система была реализована как одно из направлений деятельности по осуществлению государственного экологического мониторинга на территории края.

Еще одним ярким представителем природоохранного ПО являются электронные картографические данные – интерактивные карты. Геоинформационные системы очень часто используются с целью получения наглядной информации об объекте исследования. Это может быть карта-схема промплощадки с обозначенными точками источников выбросов и с возможностью просмотра информации о данных источниках. Здесь же можно отметить интерактивную карту несанкционированных свалок [14] или интернет-портал по контролю и сохранению биоразнообразия в урбоэкосистеме [15].

Учитывая специфику каждого конкретного региона в области природоохранной деятельности, а также отсутствие единого информационного ресурса для получения достоверной информации о состоянии окружающей природной среды на территории Курской области, актуальной становится задача создания автоматизированной системы для информационного обеспечения природоохранной деятельности в данном регионе.

Результаты и их обсуждение

Разрабатываемая система включает в себя шесть основных модулей: отходы; воздух; вода; почва; растения; животные.

Все перечисленные модули подразделяются на определенные блоки: справочно-информационный блок; отчеты; мониторинг.

1. Модуль «Отходы». Справочно-информационный блок модуля «Отходы» формируется за счет официальных данных, передаваемых организациями, осуществляющими деятельность в области обращения с твердыми коммунальными отходами, а также данными, поступающими при мониторинге объектов размещения отходов, и включает основные статистические сведения по количеству, составу образующихся в регионе отходов, воздействию объектов размещения отходов на окружающую природную среду и другую дополнительную информацию, касающуюся твердых коммунальных отходов и их воздействия на природу и человека.

Справочно-информационный блок предназначен для всех пользователей, которым необходимо получить информацию по образующимся в регионе твердым коммунальным отходам.

Блок «Отчеты» модуля «Отходы» включает в себя все возможные формы отчетности, касающиеся обращения с отходами, а также разъяснения по заполнению этих форм. Данный блок также информирует пользователей о сроках

подготовки отчетной документации по обращению с отходами производства и потребления.

Блок «Отчеты» предназначен специалистам, занимающимся формированием отчетов по форме «2- (тп) отходы» на предприятиях города и области [16].

Блок «Мониторинг» модуля «Отходы» позволяет отслеживать информацию об имеющихся точках контроля негативного воздействия на полигонах ТКО, о производимых там замерах и их результатах. Также данный блок может включать данные по мониторингу несанкционированных свалок, образующихся в регионе с использованием краудсорсингового интернет-портала [17].

2. Модуль «Воздух». Справочно-информационный блок модуля «Воздух» содержит сведения об основных источниках выбросов загрязняющих веществ на территории региона, о количестве и составе данных выбросов, об имеющемся газоочистном оборудовании на предприятиях. В данном блоке также предполагается наличие статистических данных о загрязнении атмосферного воздуха на территории региона за несколько лет.

Блок «Отчеты» модуля «Воздух» содержит форму отчетности предприятий «2 (тп) – воздух». Также приводятся разъяснения по заполнению данной формы и контрольные даты (срок подготовки и предоставления данного отчета в природоохранную организацию) [18].

Блок «Мониторинг» модуля «Воздух» предоставляет информацию об имеющихся точках контроля состояния атмосферного воздуха в регионе. Данный блок также позволяет просматривать данные, полученные в результате анализа отобранных проб в определенных контрольных точках.

3. Модуль «Вода». Справочно-информационный блок модуля «Вода» содержит сведения об имеющихся в регионе водных объектах, их состоянии, об источниках водозабора на территории региона. Также представлена информация, касающаяся загрязнения водных объектов, виды загрязняющих веществ.

Блок «Отчеты» модуля «Вода» содержит форму отчетности предприятий «2 (тп) – водхоз» с разъяснениями по заполнению данной формы [19].

В блоке «Мониторинг» модуля «Вода» представлены данные по фактическому состоянию водных объектов на территории региона, а также динамике их состояния.

4. Модуль «Почва». Справочно-информационный блок модуля «Почва» содержит информацию о преобладающих в регионе почвах, их агрохимические свойства, морфологическое описание и т. п.

Блок «Отчеты» модуля «Почва» содержит форму отчета о рекультивации земель – форма федерального статистического наблюдения № 2-ТП (рекультивация) «Сведения о рекультивации земель, снятии и использовании плодород-

ного слоя почвы». В данном блоке обозначены даты предоставления отчета, а также рекомендации по правильному заполнению его форм [20].

Блок «Мониторинг» модуля «Почва» содержит информацию по количественной и качественной оценке изменений почвенного покрова в регионе, по загрязняющим веществам органического и неорганического происхождения, поступающим в почву.

5. Модуль «Растения». Справочно-информационный блок модуля «Растения» включает в себя данные по редким и исчезающим видам растений на территории области, данные о лесном фонде региона, его составе, использовании и восстановлении. Также в данном блоке предполагается размещение информации по лесовосстановительным работам.

Блок «Мониторинг» модуля «Растения» предполагает наличие сведений об учете лесного фонда в регионе. Здесь можно ознакомиться с динамикой вырубки леса, а также с планом по ведению восстановительных работ.

6. Модуль «Животные». В справочно-информационном блоке модуля «Животные», аналогично модулю «Растения», содержится информация по редким и исчезающим видам животных на территории области. Также приводятся рекомендации по ограничению охоты в определённые периоды года с целью сохранения и восстановления популяций некоторых видов животных.

Блок «Мониторинг» модуля «Животные» позволяет отслеживать численность определенных особей, данные по миграции животных, а также информацию по многолетнему наблюдению за охотничьими видами животных.

Создание автоматизированной системы для информационного обеспечения природоохранной деятельности в регионе подразумевает также решение следующих основных задач:

- разработка базы данных, работающей по схеме «клиент-сервер»;
- организация экспорта данных;
- формирование набора выходных форм;
- подготовка и отображение информации в сети Интернет.

Процесс сбора и накопления информации в разрабатываемой системе должен базироваться на единой нормативно-справочной информации, преобразованной для работы с ней в электронном виде.

Разрабатываемый программный комплекс также предполагает наличие средств обмена информацией между различными модулями системы.

Данная система предполагает наличие следующих эксплуатационных характеристик:

- сбор данных и оперативный доступ к ним;
- однообразность хранимой в системе информации;
- оперативная обработка информации.

Выводы

Основной целью создания автоматизированной системы для информационного обеспечения природоохранной деятельности является обеспечение потребностей юридических и физических лиц в достоверной информации о состоянии окружающей среды в регионе.

Информация, накопленная в разрабатываемой системе, может использоваться для:

- формирования ежегодных сборников о состоянии и охране окружающей среды;
- осуществления оперативного экологического контроля;
- оценки антропогенной нагрузки на территорию с последующим расчетом коэффициента экологической ситуации;
- расчёта суммы платы за негативное воздействие на окружающую среду;

- принятия управленческих решений в области охраны окружающей среды, внедрения малоотходных и экологически чистых технологий;

- обеспечения экологической безопасности и осуществления государственного экологического контроля;

- разработки прогнозов социально-экономического развития региона;

- разработки целевых программ в области охраны окружающей среды, инвестиционных программ, а также мероприятий по охране окружающей среды;

- прогнозирования чрезвычайных ситуаций и проведения мероприятий по их предупреждению;

- подготовки информации для ежегодного Государственного доклада РФ «О состоянии и об охране окружающей среды».

Список литературы

1. Sedova O. V., Alekseev A. G. Development of mathematical models to calculate the effectiveness of a digital platform for environmental monitoring // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2021. Vol. 99, N 24. P. 6298-6308.
2. Computerized environmental monitoring systems / Ye. Borisova, N. Amurova, F. Kodirov, S. Abdullayeva // *Universum: технические науки*. 2022. N 2-6 (95). P. 66-70.
3. Глинянова И. Ю., Фомичев В. Т. К вопросу о совершенствовании системы регионального экологического мониторинга в селитебных зонах // *Социология города*. 2020. № 1. С. 65-74.
4. Gritz N. V., Dichensky A. V., Rostovtsev R. A. Approbation of elements of the informational and analytical crop management system // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021. P. 1-9.
5. Pilecki B. M., Vicentiy A. V. Automated geoinage generation of Arctic industrial and natural complexes for regional management information support systems // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021. P. 1-7.

6. Исследование эффективности использования информационных технологий в системе управления техносферной безопасностью / В. М. Попов, В. В. Юшин, А. В. Иорданова, А. П. Трифонов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. № 6. С. 241-255.

7. Кирильчук И. О., Иорданова А. В., Тимофеев Г. П. Социально-гигиенический мониторинг негативного воздействия выбросов автотранспорта на здоровье населения. Курск: Университетская книга, 2021. 144 с.

8. Гордеев П. Е. Программное обеспечение природоохранной деятельности: современное состояние и перспективы // Актуальная биотехнология. 2017. № 3 (22). С. 79-81.

9. Киселева Т. В., Михайлов В. Г., Михайлов Г. С. Разработка и применение программных продуктов для повышения эффективности управления природоохранной деятельностью предприятия // Информатизация и связь. 2020. № 6. С. 56-60.

10. Кирильчук И. О., Иорданова А. В., Новицкая С. А. Проблемы построения современных СППР в сфере экологии и природопользования // Исследование инновационного потенциала общества и формирование направлений его стратегического развития: сборник научных статей XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Курск: Университетская книга, 2021. С. 473-477.

11. Рыбкина Ю. В., Иорданова А. В., Кирильчук И. О. Анализ программных и технических средств для структурно-функционального моделирования в природоохранной деятельности // Наука молодых – будущее России: сборник научных статей IV Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. Курск: Университетская книга, 2019. С. 78-81.

12. Кирильчук И. О., Иорданова А. В. Разработка программного комплекса для оценки опасности несанкционированных свалок // II Международная научно-практическая конференция молодых ученых по проблемам техносферной безопасности: сборник трудов / Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева. М., 2017. С. 155-158.

13. Исследование эффективности использования информационных технологий в системе управления техносферной безопасностью / В. М. Попов, В. В. Юшин, А. В. Иорданова, А. П. Трифонов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. № 6. С. 241-255.

14. Разработка интернет-портала по учету стихийных несанкционированных свалок / И. О. Кирильчук, В. В. Юшин, А. В. Иорданова, Е. А. Грибов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. № 2. С. 8-23.

15. Разработка краудсорсингового интернет-портала для обнаружения и контроля численности редких и исчезающих видов растений в урбоэкосистеме на примере г. Курска / И. О. Кирильчук, Ю. В. Вертакова, О. И. Белякова, И. Е. Тюрин // Актуальные

направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2021. № 2 (53). С. 103-116.

16. Шарова И. В. Формирование годовой статистической отчетности 2-тп (отходы) // Вестник современных исследований. 2018. № 12.1 (27). С. 431-432.

17. Кирильчук И. О., Иорданова, А. В., Филист С. А. Совершенствование методов оценки негативного воздействия объектов размещения отходов на окружающую среду и здоровье населения // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. № 1. С. 82-97.

18. Мангасаров Ю. Ю., Козлова В. А. Актуальные проблемы развития экологической отчетности российской федерации // Актуальные проблемы экономики и права: сборник научных статей по материалам Международной научно-практической конференции: в 2 ч. / Ростовский институт (филиал) Всероссийского государственного университета юстиции (РПА Минюста России). Ростов н/Д, 2020. С. 33-35.

19. Современные проблемы оценки, регулирования и мониторинга качества поверхностных вод / Е. В. Веницианов, Г. В. Аджиенко, А. А. Возняк, М. А. Чиганова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 1. С. 47-59.

20. Пушкарева В. С. Историческое начало рекультивации и обзор современных технологий рекультивации земель // Экологические чтения-2021: сборник XII Национальной научно-практической конференции с международным участием / Омский государственный университет им. П. А. Столыпина. Омск, 2021. С. 576-581.

References

1. Sedova O. V., Alekseev A. G. Development of mathematical models to calculate the effectiveness of a digital platform for environmental monitoring. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2021, vol. 99, no. 24, pp. 6298-6308.

2. Borisova Ye., Amurova N., Kodirov F., Abdullayeva S. Computerized environmental monitoring systems. *Universum: Technical Sciences*, 2022, no. 95, pp. 66-70.

3. Glinyanova I. Yu., Fomichev V. T. K voprosu o sovershenstvovanii sistemy regional'nogo ekologicheskogo monitoringa v selitebnykh zonakh [On the issue of improving the system of regional environmental monitoring in residential areas]. *Sociologiya goroda = Sociology of the City*, 2020, no. 1, pp. 65-74.

4. Gritz N. V., Dichensky A. V., Rostovtsev R. A. Approbation of elements of the informational and analytical crop management system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, pp. 1-9.

5. Pilecki B. M., Vicentiy A. V. Automated geimage generation of Arctic industrial and natural complexes for regional management information support systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, pp. 1-7.

6. Popov V. M., Yushin V. V., Iordanova A. V., Trifonov A. P. Issledovanie effektivnosti ispol'zovaniya informatsionnykh tekhnologii v sisteme upravleniya tekhnosfernoi bezopasnost'yu [Investigation of the effectiveness of the use of information technologies in the technosphere security management system]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2019, no. 6, pp. 241-255.

7. Kirilchuk I. O., Iordanova A.V., Timofeev G. P. Sotsial'nogigienicheskii monitoring negativnogo vozdeistviya vybrosov avtotransporta na zdorov'e naseleniya [Socio-hygienic monitoring of the negative impact of vehicle emissions on public health]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2021, pp. 144.

8. Gordeev P. E. Programmnoe obespechenie prirodookhrannoi deyatel'nosti: sovremennoe sostoyanie i perspektivy [Software for environmental protection: current state and prospects]. *Aktual'naya biotekhnologiya = Current Biotechnology*, 2017, no. 3 (22), pp. 79-81.

9. Kiseleva T. V., Mikhailov V. G., Mikhailov G. S. Razrabotka i primeneniye programmnykh produktov dlya povysheniya effektivnosti upravleniya prirodo-okhrannoi deyatel'nost'yu predpriyatiya [Development and application of software products to improve the efficiency of environmental management of the enterprise]. *Informatizatsiya i svyaz' = Informatization and Communication*, 2020, no. 6, pp. 56-60.

10. Kirilchuk I. O., Iordanova A. V., Novitskaya S. A. [Problems of building modern DSS in the field of ecology and nature management]. Issledovanie innovatsionnogo potentsiala obshchestva i formirovaniye napravleniy ego strategicheskogo razvitiya. Sbornik nauchnykh statej 11-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Research of innovative potential of society and formation of directions of its strategic development. Collection of scientific articles of the 11th All-Russian scientific and practical conference with international participation]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2021, pp. 473-477. (In Russ.)

11. Rybkina Yu. V., Iordanova A. V., Kirilchuk I. O. [Analysis of software and hardware for structural and functional modeling in environmental activities]. Nauka molodyh – budushchee Rossii. Sbornik nauchnykh statej 4-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferentsii perspektivnykh razrabotok molodyh uchenykh [Young Science – the future of Russia. Collection of scientific articles of the 4th International Scientific Conference of promising developments of young scientists]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2019, pp. 78-81. (In Russ.)

12. Kirilchuk I. O., Iordanova A. V. [Development of a software package for assessing the danger of unauthorized landfills]. II Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodyh uchenykh po problemam tekhnosfernoj bezopasnosti. Collection of works [II International Scientific and Practical Conference of Young Scientists on the problems of technosphere security. Sbornik trudov]. Moscow, D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology Publ., 2017, pp. 155-158. (In Russ.)

13. Popov V. M., Yushin V. V., Iordanova A. V., Trifonov A. P. Issledovanie effektivnosti ispol'zovaniya informatsionnykh tekhnologii v sisteme upravleniya tekhnosfernoi bezopasnost'yu [Investigation of the effectiveness of the use of information technologies in the technosphere security management system]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2019, no. 6, pp. 241-255.

14. Kirilchuk I. O., Yushin V. V., Iordanova A. V., Gribov E. A. Razrabotka internet-portala po uchetu stikhiinykh nesanktsionirovannykh svalok [Development of an Internet portal for accounting for spontaneous unauthorized landfills]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation*, 2020, no. 2, pp. 8-23.

15. Kirilchuk I. O., Vertakova Yu. V., Belyakova O. I., Tyurin I. E. Razrabotka kraudsoringovogo internet-portala dlya obnaruzheniya i kon-trolya chislennosti redkikh i ischezayushchikh vidov rastenii v urboekosisteme na primere g. Kurska [Development of a crowdsourcing Internet portal for the detection and control of the number of rare and endangered plant species in the urban ecosystem on the example of Kursk]. *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika = Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*, 2021, no. 2(53), pp. 103-116.

16. Sharova I. V. Formirovanie godovoi statisticheskoi otchetnosti 2-tp (ot-khody) [Formation of annual statistical reporting 2-tp (waste)]. *Vestnik sovremennyh issledovaniy = Bulletin of Modern Research*, 2018, no. 27, pp. 431-432.

17. Kirilchuk I. O., Iordanova A. V., Filist S. A. Sovershenstvovanie metodov otsenki negativnogo vozdeistviya ob"ektov razmeshcheniya otkhodov na okruzhayushchuyu sredu i zdorov'e naseleniya [Improvement of methods for assessing the negative impact of waste disposal facilities on the environment and public health]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation*, 2021, no. 1, pp. 82-97.

18. Mangasarov Yu. Yu., Kozlova V. A. [Actual problems of development of environmental reporting of the Russian Federation]. *Aktual'nye problemy ekonomiki i prava. Sbornik nauchnyh statej po materialam mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Actual problems of economics and law. Collection of scientific articles based on the materials of the international scientific and practical conference]*. Rostov-on-Don, Rostov Institute (branch) All-Russian State University of Justice (RPA of the Ministry of Justice of Russia) Publ., 2020, pp. 33-35. (In Russ.)

19. Venitsianov E. V., Adzienko G. V., Wozniak A. A., Chiganova M. A. *Sovremennye problemy otsenki, regulirovaniya i monitoringa kachestva poverkhnostnykh vod* [Modern problems of assessment, regulation and monitoring of surface water quality]. *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie = Water Management in Russia: Problems, Technologies, Management*, 2018, no. 1, pp. 47-59.

20. Pushkareva V. S. [The historical beginning of reclamation and a review of modern technologies of land reclamation]. *Ekologicheskie chteniya-2021. Sbornik XII Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* [Ecological readings-2021. Collection of the XII National Scientific and Practical Conference with international participation]. Omsk, Omsk State University named after P. A. Stolypin Publ., 2021, pp. 576-581. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Иорданова Анастасия Владимировна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры охраны труда и окружающей среды, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: asy.gnezdilova@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-7780-497X, Researcher ID: AAH-7282-2020

Anastasiya V. Iordanova, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Lecturer of the Department of Labor Protection and Environment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: asy.gnezdilova@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-7780-497X, Researcher ID: AAH-7282-2020

Кирильчук Ираида Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры охраны труда и окружающей среды, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: iraida585@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8636-9340, Researcher ID: N-8966-2016

Iraida O. Kirilchuk, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Labor Protection and Environment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: iraida585@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8636-9340, Researcher ID: N-8966-2016

Семенова Анастасия Евгеньевна, студент кафедры охраны труда и окружающей среды, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nastiasemenova2512@gmail.ru

Anastasia E. Semenova, Student of the Department of Labor Protection and Environment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nastiasemenova2512@gmail

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-40-58>



Разработка и реализация интернет-платформы агрегатора автосервисов

Т. И. Лапина¹ ✉, В. А. Сарычев², В. Ю. Цевка¹

¹ Юго-Западный государственный университет

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

² АО «НПП «Радар ммс»

ул. Новосельковская 37, лит. А, г. Санкт-Петербург 197375, Российская Федерация

✉ e-mail: lapinati@mail.ru

Целью исследования является разработка интернет-платформы агрегаторов автосервисов, или торговой площадки, или маркетплейса с целью устранения противоречия, при котором потребитель не может найти требуемый товар или услугу, а компания затрудняется в поиском клиентов.

Методы. При создании программной реализации платформы агрегаторов автосервисов использован язык PHP. Интерфейс создан с использованием HTML, CSS. Был использован CSS фреймворк Lareval 9.2, при проектировании интерфейса использована библиотеки: SticSlider – библиотека для слайдера, Wow J5 – библиотека анимации, React.js в связке Redux.

Результаты. Web-ресурс позволяет агрегировать разбросанную по сети информацию и устранить трудности для клиентов в поиске товаров и услуг, для заказчиков в поиске исполнителей работ и для компаний в поиске своих клиентов и заказчиков. Предоставляет возможность создания единой базы контактов и взаимодействий с клиентами через основные каналы коммуникации, что дает возможность анализировать и улучшать стратегию продвижения товаров и услуг автосервисов.

Заключение. В ходе выполнения проекта разработано и реализовано программное обеспечение интернет-платформы агрегаторов автосервисов. Результаты тестирования показали, что программная система полностью удовлетворяет функциональным требованиям и готова к использованию.

Ключевые слова: web-ресурс; интернет платформа агрегатора; проектирование web-ресурсов.

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

Для цитирования: Лапина Т. И., Сарычев В. А., Цевка В. Ю. Разработка и реализация интернет-платформы агрегатора автосервисов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 2. С. 40–58. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-40-58>.

Поступила в редакцию 11.04.2022

Подписана в печать 10.05.2022

Опубликована 27.06.2022

© Лапина Т. И., Сарычев В. А., Цевка В. Ю., 2022

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление,
вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022; 12(2): 40–58

Development and Implementation of the Internet Platform of the Car Service Aggregate

Tatyana I. Lapina¹ ✉, Valentin A. Sarychev², Vitaliy Y. Tsevka¹

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

² JSC Radar mms,
37 A Novoselkovskaya Str., Petersburg 197375, Russian Federation

✉ e-mail: lapinati@mail.ru

The purpose of research is the development of an Internet platform of car service aggregators, or a trading platform, or a marketplace in order to eliminate the contradiction in which the consumer cannot find the required product or service, the company finds it difficult to find customers.

Methods. When creating a software implementation of the platform of autoservice aggregators, the PHP language was used, the interface was created using HTML, CSS. The Lareval 9.2 CSS framework was used, the following libraries were used when designing the interface: SticSlider - library for the slider, Wow J5 - animation library, React.js in the Redux bundle.

Results. A Web resource allows you to aggregate information scattered over the network and eliminate difficulties for customers in finding goods and services, for customers in finding contractors for work, and for companies in finding their customers and customers. Provides the ability to create a single database of contacts and interactions with customers through the main communication channels, which makes it possible to analyze and improve the strategy for promoting goods and services of car services.

Conclusion. In the course of the project, the software for the Internet platform of car service aggregators was developed and implemented. The test results showed that the software system fully meets the functional requirements and is ready for use.

Keywords: web resource; internet aggregator platform; designing web-resources.

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

For citation: Lapina T. I., Sarychev V. A., Tsevka V. Y. Development and Implementation of the Internet Platform of the Car Service Aggregate. *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.* 2022; 12(2): 40–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-40-58>.

Received 11.04.2022

Accepted 10.05.2022

Published 27.06.2022

Введение

Интернет изменил принципы торговли и предоставления сервисных услуг: конкуренция больше не основывается на отношениях между дистрибьютером и эксклюзивным производителем, в которых потребитель или пользователь играет второстепенную роль.

Кроме того, в настоящее время, особенно в условиях изоляции и ограничений, связанных с распространением вирусных инфекций, большинство потребителей получают информацию и совершают сделки с помощью компьютерных сетей и Интернета.

Теперь главным фактором, определяющим успех бизнеса, является опыт пользователя (user experience): лучшие дистрибьютеры предоставляют условия для лучшего опыта пользователей, что увеличивает количество пользователей, следовательно, привлекает больше поставщиков, а множество поставщиков улучшает опыт пользователя.

Сегодня создано много web-приложений и web-сервисов, с помощью которых компании осуществляют рекламу и реализацию продукции и услуг.

У этих программных продуктов одинаковая цель – реализация своей продукции или услуг, но различный подход к исполнению.

Так как информация разбросана по сети, пользователям приходится посещать множество аналогичных сервисов для того, чтобы увеличить эффект работы.

Все это создает трудности для клиентов в поиске товаров и услуг, заказчиков – в поиске исполнителей работ, для компаний поставщиков – в поиске своих клиентов и заказчиков.

Возникает противоречие: с одной стороны, есть спрос, с другой – предложение, но партнеры не могут быстро ориентироваться в информационном пространстве и найти друг друга.

Например, заказчик хочет разместить задачу на тендерной площадке. Для того чтобы увеличить количество поданных заявок, он тратит время на повторяющуюся работу: создание оферта и

заполнение данных о проекте на различных фриланс-биржах.

Материалы и методы

В настоящее время актуальной является задача создания программных продуктов – агрегаторов, которые помогают компаниям-поставщикам, заказчикам и клиентам-поставщикам и покупателям находить друг друга.

Наглядными примерами успешных агрегаторов являются Alibaba, Wildberries, Facebook и Google.

Программная платформа агрегатора позволяет дистрибьютору интегрироваться с пользователями или клиентами в больших масштабах, а стоимость дистрибуции цифровых товаров в компьютерных сетях определяется коммерческой политикой владельца агрегатора (обычно 8-10%).

В настоящее время существует множество электронных торговых площадок, таких как Wildberries, Ozon и т. д.

Однако использование этих платформ требует загрузки своих данных. Например, нужно ввести данные в форму регистрации; оформить заявку на сайте регистрации поставщиков, заполнив все необходимые данные, подтвердив согласие с условиями сотрудничества и загрузив документы компании.

Поэтому многие компании ставят задачу создания собственных агрегаторов для реализации только своей продукции без дополнительных расходов.

При этом на платформе агрегатора компания-владелец имеет право дополнительно разместить другие программные ресурсы компании и постоянно их обновлять и дополнять.

Таким образом, агрегатор, или торговая площадка, или маркетплейс – это web-ресурс, на котором предлагают свои товары или услуги разные компании, фирмы или интернет-магазины и который имеет следующие преимущества перед простым интернет-магазином:

- предоставляет пользователю качественный для пользователей контент: подробное описание товаров, фото и видео, характеристики, подробную и точную информацию о продукции или услуге, иногда более подробную и точную информацию, чем сама компания на своем сайте;

- имеет удобный интерфейс, адаптивную верстку, быструю загрузку страниц, удобный поиск и сортировку страниц;

- имеют большее количество ссылок и полезного контента, а значит, поднимаются в топ поисковой выдачи.

Достоинством агрегаторов является то, что агрегаторы предоставляет пользователю качественный для пользователей контент: подробное описание товаров, фото и видео, характеристики, подробную и точную информацию о продукции или услуге, иногда более подробную и точную информацию, чем сама компания на своем сайте, имеют

удобный интерфейс, имея адаптивную верстку, быструю загрузку страниц, удобный поиск, выполняют сортировку страниц (например, самые ходовые или дешевые товары), попадают в топ: в отличие от интернет-магазинов, они имеют большее количество ссылок и полезного контента, а значит, поднимаются в топ поисковой выдачи.

Агрегаторы могут использоваться для предоставления сведений о сервисных услугах компаний, например для упрощения работы автосервисов.

Задачей агрегатора услуг автосервисов является поиск, привлечение, удержание и ведение списка клиентов, автоматический расчёт стоимости работ и подготовка бухгалтерской документации, рассылка уведомления по SMS или электронной почте о готовности автомобиля, контроль работы каждого мастера, получение отзывов клиентов, подготовка статистических отчётов, автоматизация формирования маркетинговых кампаний для повышения узнаваемости бренда.

Таким образом, разработка программных средств агрегатора для компании, реализующей свою продукцию или услуги, является актуальной задачей в развитии цифровых технологий.

Деятельность интернет-ресурсов в настоящее время требует нормативной и законодательной базы.

Президент России Владимир Путин подписал закон о регулировании агрегаторов товаров и услуг, который начал действовать с 1 января 2019 г. Данный законопроект приняли Госдума и Совет Федерации.

Законопроект устанавливает ответственность «владельцев агрегаторов информации о товарах и услугах» за недостоверную информацию об услуге, товаре или продавце. Ранее такого понятия в российском законодательстве не было.

Согласно законопроекту, владельцем агрегатора считаются «...организация независимо от организационно-правовой формы либо индивидуальный предприниматель, которые являются владельцами программы для электронных вычислительных машин и (или) владельцами сайта и (или) страницы сайта в информационно-телекоммуникационной сети Интернет и которые предоставляют потребителю в отношении определённого товара (услуги) возможность одновременно ознакомиться с предложением продавца (исполнителя) о заключении договора купли-продажи товара (договора возмездного оказания услуг), заключить с продавцом (исполнителем) договор купли-продажи (договор возмездного оказания услуг), а также произвести предварительную оплату указанного товара (услуги) путём перевода денежных средств владельцу агрегатора в рамках применяемых форм

безналичных расчётов в соответствии с правилами, установленными федеральными законами».

Чтобы площадка считалась агрегатором, она должна соответствовать всем трём критериям одновременно [1; 2].

То есть при подобном определении «агрегатора» такие маркетплейсы, как *AlliExpress* или *Беру!*, формально могут считаться агрегаторами, а вот *Яндекс.Маркет* – не может. *Яндекс.Маркет* до 2016 г. был традиционным поисковиком – получал деньги за размещение товаров и за переходы на сайты интернет-магазинов. Работал по модели CPC – cost per click, или плата за клик. Переход пользователей с *Маркета* на сайты магазинов был неудобен. Компания тестирует новую модель, которая позволяла бы покупать товары прямо на *Маркете* без перехода на внешние площадки или модель CPA – cost per action (плата за действие). Продавец платит комиссию агрегатору – 2% с каждого заказа [3; 4].

В данной статье приведен подход к созданию и разработке программного обеспечения интернет-платформы агрегатора автосервисов и модели онлайн-взаимодействия с клиентами для оптимизации рыночной стоимости продукции и услуг.

Формирование функциональных требований к программному изделию включают в себя требования бизнеса и требования пользователей.

В разрабатываемом программном продукте реализованы следующие функции: авторизация пользователей, регистрация нового пользователя, просмотр агрегируемых товаров и услуг автосервисов, выбор услуги, оформление заявки

на услугу, покупка сопутствующих товаров, оплата товаров или услуги, получение справки о территориальном расположении автосервисов относительно местонахождения клиента.

Диаграмма вариантов использования представлена ниже (рис. 1).

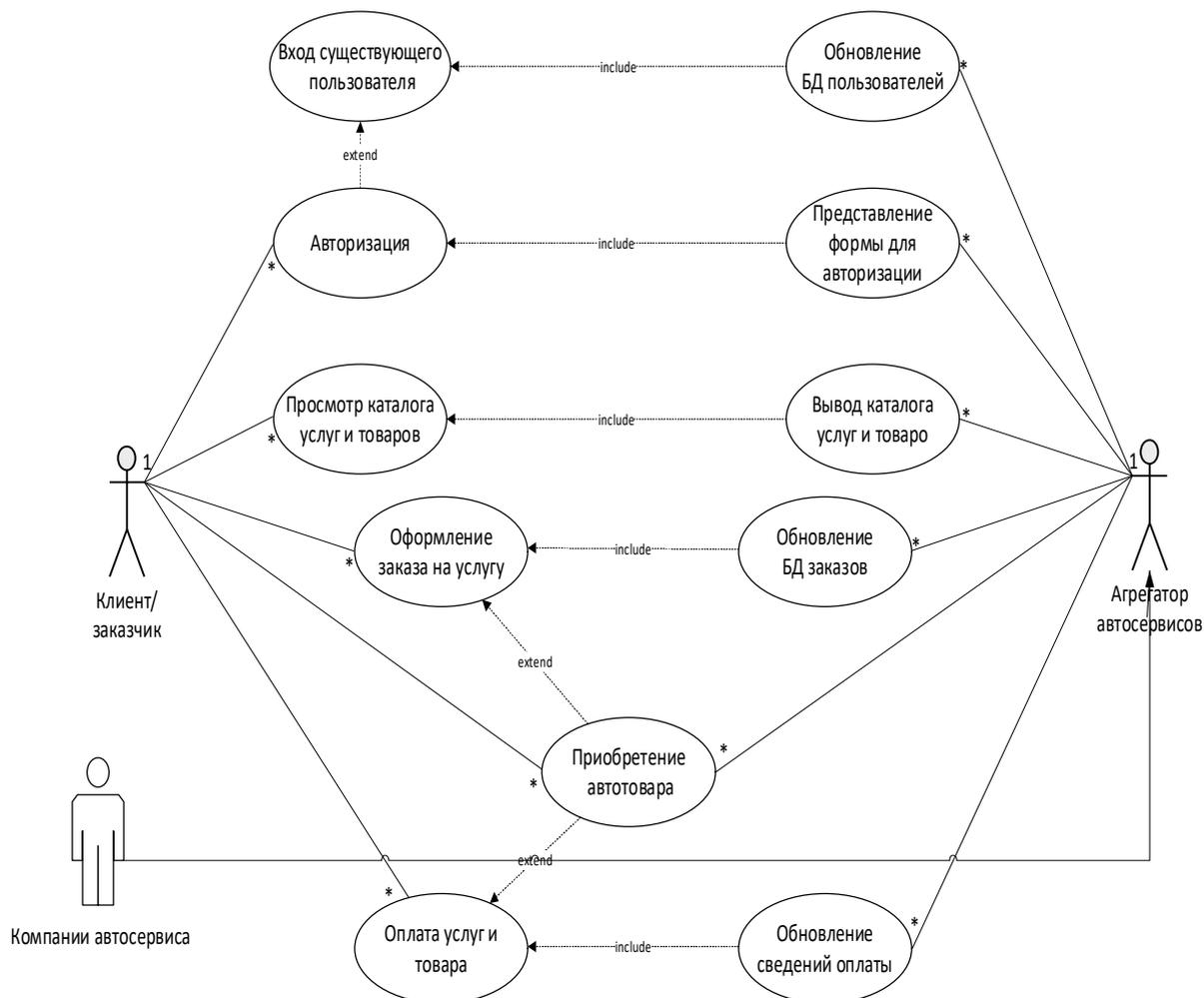


Рис. 1. Диаграмма вариантов использования

Fig. 1. Diagram of use cases

В User Flow определяют задачу (сценарий), которая стоит перед пользователем. Пользовательские сценарии (логические схемы) помогают определить ключевую логику работы пользователя с

программным продуктом. Они показывают путь пользователя при решении задач [5; 6].

Логика работы программного продукта для компаний автосервиса приведена ниже (рис. 2).



Рис. 2. Логика работы программного продукта для компаний автосервиса

Fig. 2. The logic of the software product for car service companies

Действующие лица (актеры) на диаграмме:

- компании автосервиса – предоставляют свои услуги и товары;
- агрегатор – выполняет выбранную клиентом услугу, предоставляет отчет об исполнении;
- клиент – предоставляет свои данные и сведения об оплате, выбирает услугу.

Для программной реализации рассматриваемого проекта в работе разработано клиентское web-приложение на языке программирования JavaScript. Приложение, рассмотренное в данном разделе, написано по последним стандартам JavaScript (ES6+), Backend PHP 8.0 [7; 8; 9].

Рассмотрим сопутствующие технологии, используемые в создании данной программной системы.

Результаты и их обсуждение

Интерфейс создан с использованием языка разметки HTML5 и таблицы стилей CSS3. Позиционирование элементов выполнено с помощью современных технологий сеток, позволяющих делать интерфейс адаптивным и располагать элементы удобно [9; 10].

Рассмотрим результат разработки (рис. 3–5).

Также при разработке был использован CSS фреймворк Lareval 9.2, предоставивший некоторые стили для элементов.

В проектировании интерфейса использована библиотеки: SticSlider – библиотека для слайдера; Wow J5 – библиотека анимации; React.js – в связке Redux [5; 11].

Для хранения данных использованы возможности PhpMyAdmin.

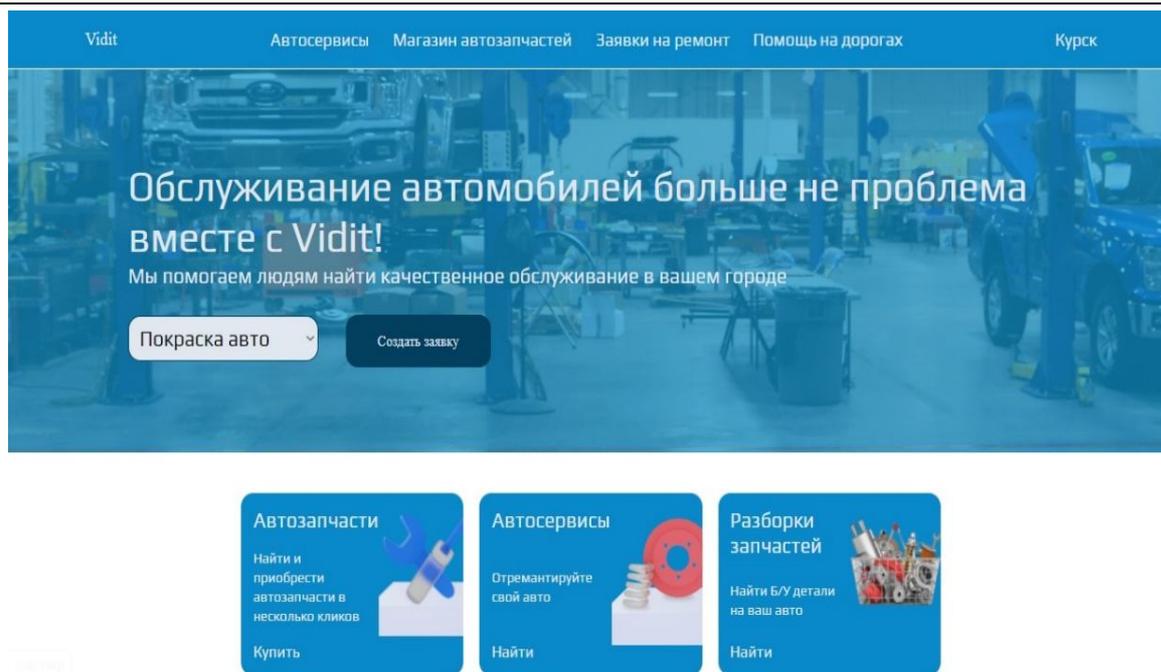


Рис. 3. Главная страница агрегатора

Fig. 3. Main page of the aggregator

Совместное использование данных технологий увеличивает производительность программного интерфейса агрегатора, делает перерисовку компонентов более интеллектуальной, скоростной и менее затратной для ресурсов компьютера [10; 12].

Приложение имеет стационарную и мобильные версии [13].

На рисунке 4 приведены главная страница мобильной версии программного средства.

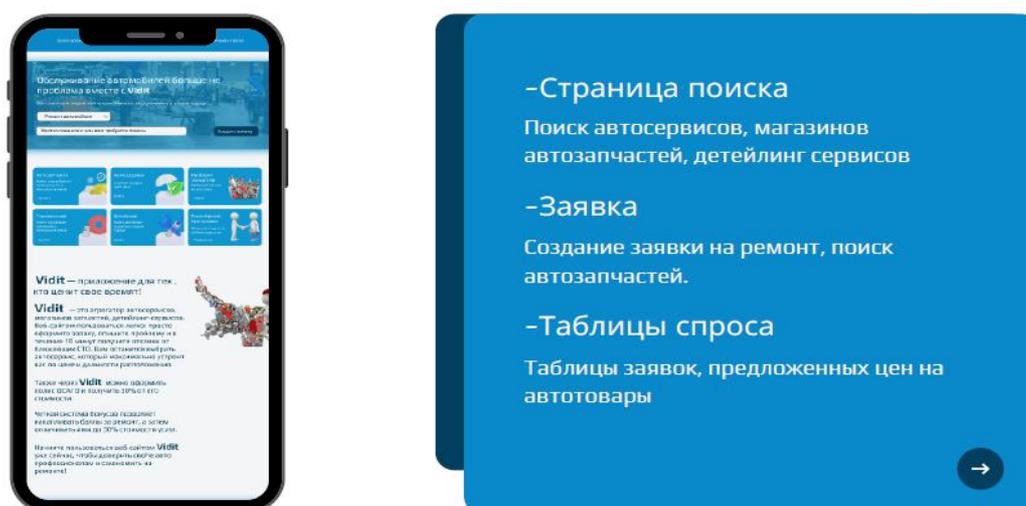


Рис. 4. Мобильная версия агрегатора

Fig. 4. Mobile version of the aggregator

На рисунке 5 показан процесс взаимодействия клиента с интерфейсом агрегатора автосервисов Vedit:

- основные бизнес-операции, реализуемые агрегатором;
- авторизация и регистрация пользователей;
- создание заявки;
- поиск по ключам и фильтрам;
- поиск ближайшего к клиенту автосервиса по геолокации;
- обратная связь с клиентом, возможность оставить отзыв.

При оформлении заявки на приобретение товаров или подбор автосервиса и

услуги, соответствующей требованиям, клиент должен выполнить ряд этапов или шагов для авторизации, предоставления сведений для обратной связи и задания условий и критериев поиска требуемой ему услуги по ремонту, обслуживанию автомобиля или приобретению сопутствующих товаров.

При начале работы с программным средством требуется выполнить этапы регистрации и авторизации [14; 15].

Рассмотрим пример взаимодействия с клиентом автосервиса (рис. 5).

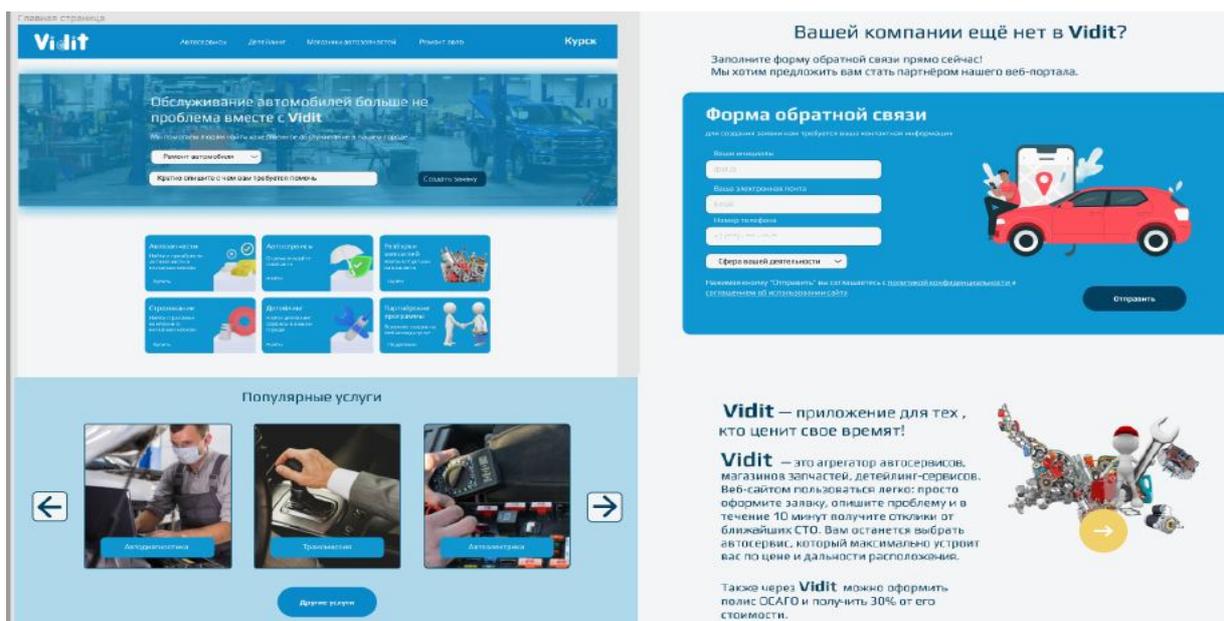


Рис. 5. Пример взаимодействия с клиентом автосервиса

Fig. 5. An example of interaction with a car service client

При просмотре каталога и выборе услуги пользователь попадает на страницу, которая позволяет определить переход в магазин автозапчастей, выбрать

просмотр услуг агрегируемых автосервисов или выбрать услугу помощи на дорогах в аварийных ситуациях (рис. 6).

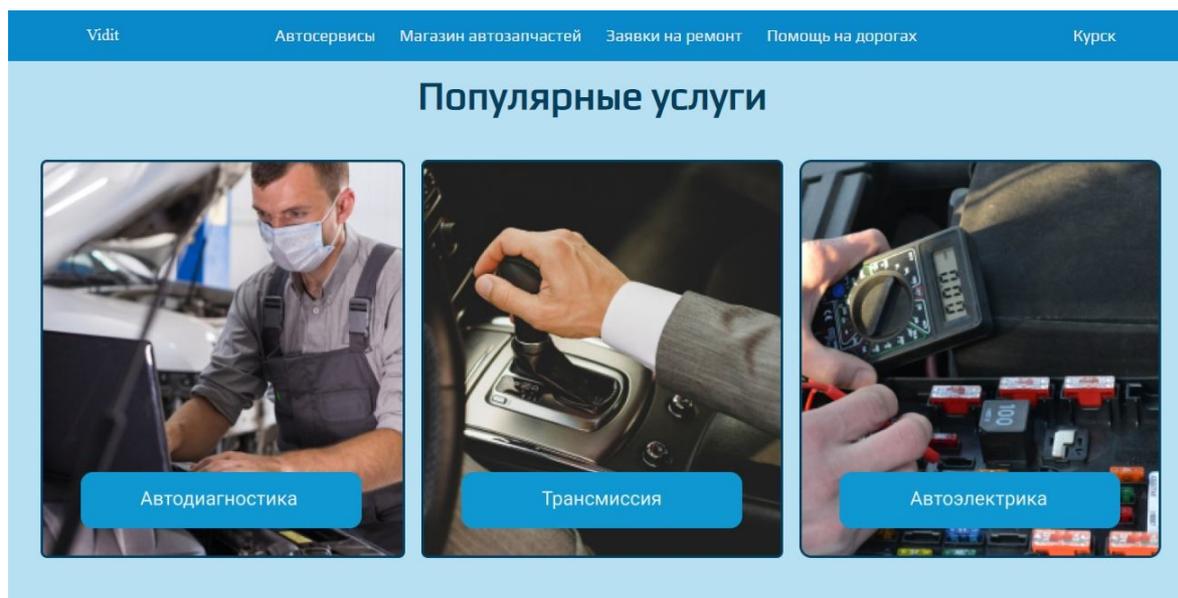


Рис. 6. Вид страницы услуг автосервисов

Fig. 6. View of the page of car services

Рисунок 7 показывает страницу заполнения данных для обратной связи с клиентом компании.

Следующим шагом оформления заявки является указание района поиска

автосервиса и описание проблемы, имеющийся у клиента, и виды обслуживания или ремонтных работ, которые он желает произвести (рис. 8).

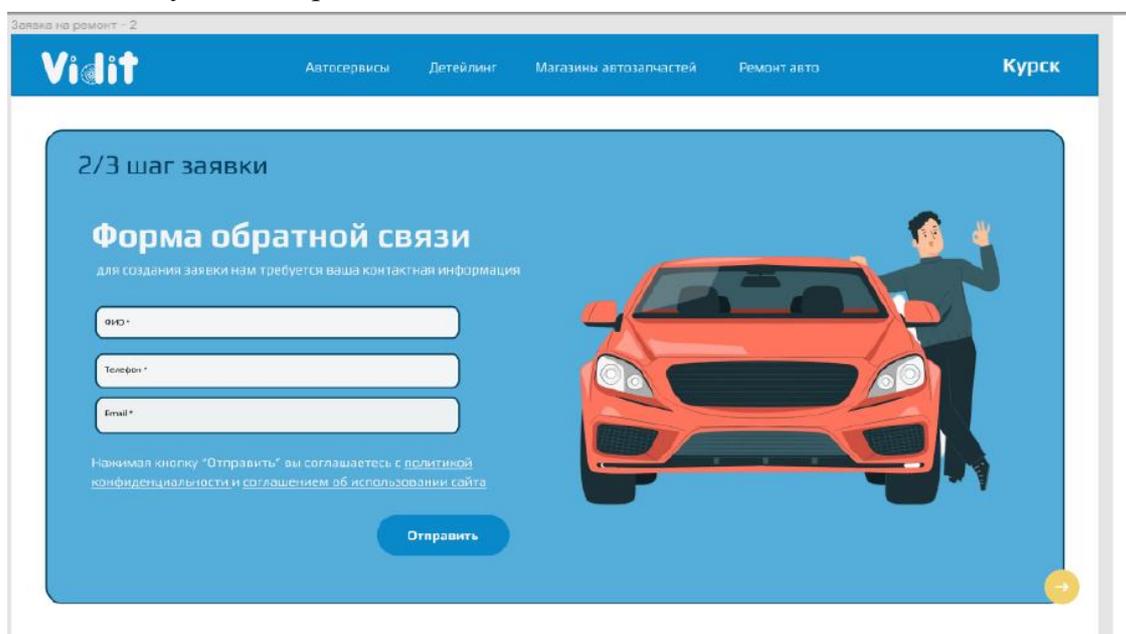


Рис. 7. Страница заполнения данных для обратной связи с клиентом (шаг 2 заявки)

Fig. 7. Page for filling in data for feedback with the client (step 2 of the application)

Рис. 8. Определение критериев поиска (шаг 3 заявки)

Fig. 8. Determination of search criteria (step 3 of the application)

Результаты поиска, возможные варианты, компании и цены на услуги приведены на рисунке 9 [16; 17].

При желании компаний автосервиса или сервисных пунктов зарегистриро-

ваться в системе и стать партнером платформы агрегатора автосервисов компании-пользователю предоставляется форма для заполнения сведений и регистрации (рис. 10).

Рис. 9. Результаты запроса пользователя

Fig. 9. User query results

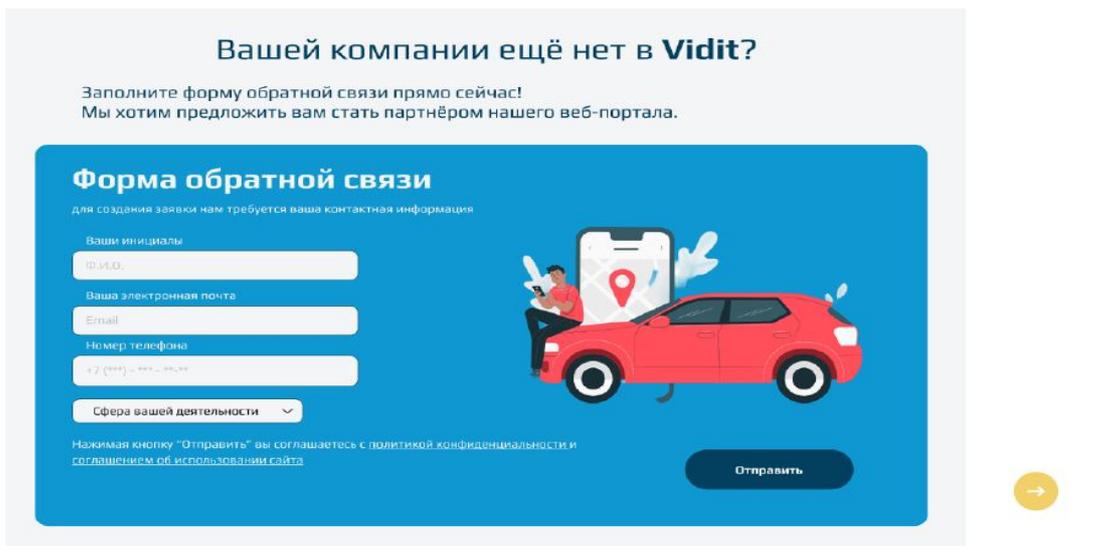


Рис. 10. Регистрация компании автосервиса на платформе агрегатора автосервисов

Fig. 10. Registration of a car service company on the platform car service aggregator

Страница, приведенная на рисунке 11, дает возможность быстро и удобно

выбрать компанию автосервиса по геолокации.

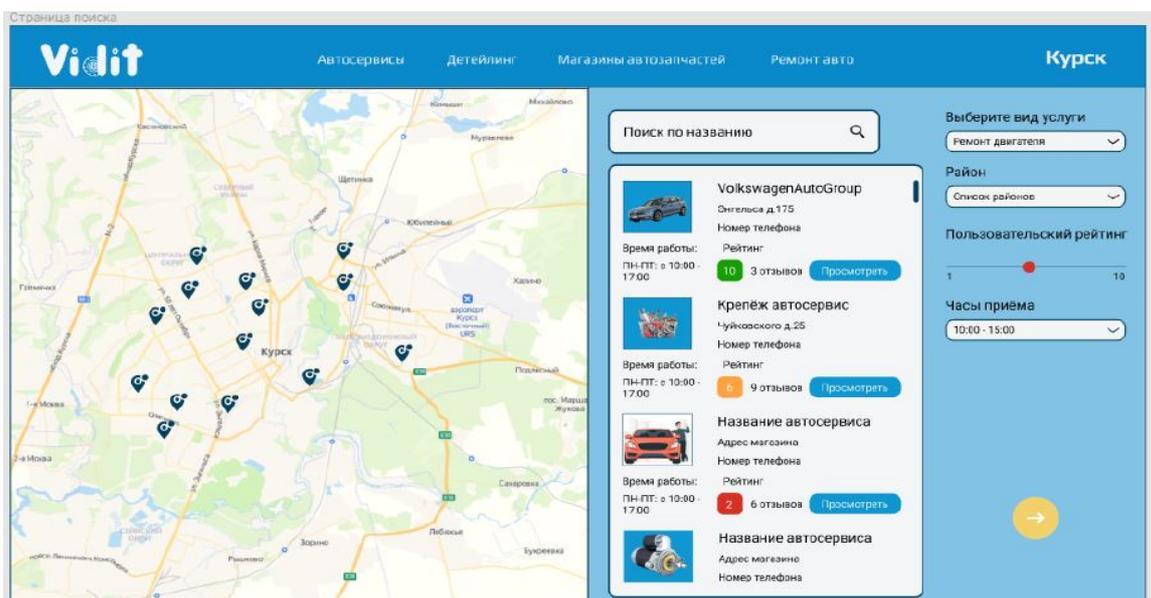


Рис. 11. Территориальное размещения служб и компаний автосервиса

Fig. 11. Territorial location of services and car service companies

Пользователь может оценить близость и доступность компаний в соответствии с его нахождением и удален-

ностью от автосервиса, что в ряде случаев аварийной поломки является существенным критерием выбора [1; 8].

Рисунок 12 показывает страницу заполнения данных для обратной связи с клиентом компании.

Пользователь может решать следующие проблемы с помощью платформы

агрегатора: выполнить ремонт или обслуживание автомобиля; приобрести запчасти или сопутствующие товары; просмотреть акции и спецпредложения; узнать о скидках и акциях (рис. 13).

Рис. 12. Страница заполнения данных для обратной связи

Fig. 12. Page for filling in data for feedback

Рис. 13. Выбор действия пользователя

Fig. 13. Selecting a user action

На странице контактных данных приведены сведения о компании авто-

сервиса, времени работы и телефоны для связи (рис. 14).

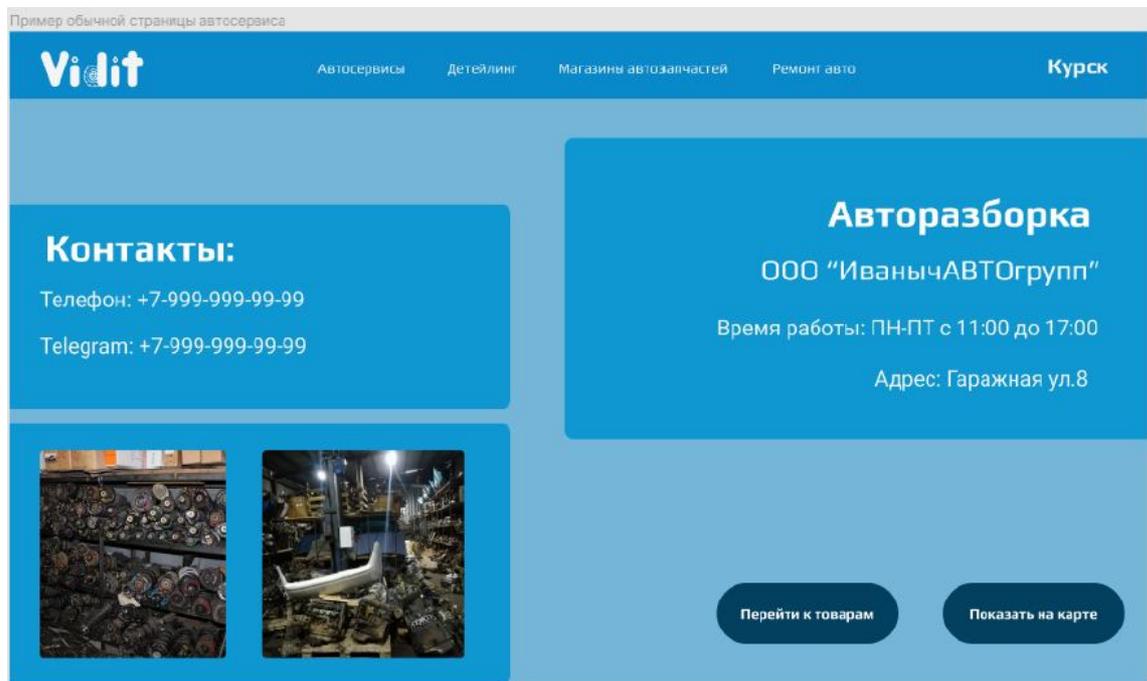


Рис. 14. Контактные данные автосервиса

Fig. 14. Contact details of the car service

Согласно законопроекту, агрегаторы обязаны предоставлять покупателям полную информацию о себе, товаре, продавцах, исполнителях и производителях, в т. ч. названия компаний, адреса, режимы работы и ОГРН. В случае если агрегатор представил неполную или недостоверную информацию, он обязан возместить полученные из-за этого покупателем убытки [18; 19; 20].

Хорошо организованная и продуманная архитектура агрегатора позволяет решать целый ряд задач компаний автосервиса:

– вовремя оповещать всех клиентов одновременно через разные каналы коммуникации о новых видах товаров и услуг компании;

– возможность взаимодействия с клиентами через основные каналы коммуникации;

– создание единой базы контактов и взаимодействий с клиентами, что даст в будущем возможность анализировать и улучшать стратегию продвижения услуг автосервисов.

Выводы

Интернет изменил принципы торговли и предоставления сервисных услуг. Конкуренция больше не основывается на отношениях между дистрибьютером и эксклюзивным производителем, в которых потребитель (или пользователь) играет второстепенную роль.

Расширение сферы цифровой экономики и электронной торговли повышает долю сделок, совершаемых с помощью компьютерных сетей и Интернет. В данных условиях возникает потребность в разработке средств для предоставления пользователю удобного сервиса, или торговой площадки, или агрегатора товаров и услуг.

В данной статье рассмотрена разработка платформы агрегатора автосервисов для г. Курска. Программное средства платформы агрегатора автосервисов, рассмотренное в данной статье, полностью реализует свои функции, обеспечивая существенные преимущества по сравнению с существующими коммер-

ческими web-ресурсами и интернет-магазинами.

Интернет-платформа агрегатора автосервисов предоставляет пользователю качественный для пользователей контент: подробное описание товаров, фото и видео, характеристики, подробную и точную информацию о продукции или услуге, иногда более подробную и точную информацию, чем сама компания на своем сайте; имеет удобный интерфейс, адаптивную верстку, быструю загрузку страниц, удобный поиск и сортировку страниц; обеспечивает большее количество ссылок и полезного контента, а значит, поднимается в топ поисковой выдачи.

Список литературы

1. Гулятьев А. К., Машин В. А. Проектирование и дизайн пользовательского интерфейса. М.: Корона-Принт, 2010. 350 с.
2. Гринберг М. Разработка веб-приложений с использованием Flask на языке Python. М.: ДМК Пресс, 2016. 272 с.
3. Хассан Г. UML. Проектирование систем реального времени, параллельных и распределенных приложений. М.: ДМК Пресс, 2016. 700 с.
4. Грекул В. И., Денищенко Г. Н., Коровкина Н. Л. Управление внедрением информационных систем. М.: Интернет-Университет Информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 224 с.
5. Никсон Р. Создаем динамические веб-сайты с помощью PHP, MySQL, JavaScript, CSS и HTML5. 4-е изд. СПб.: Питер, 2016. 768 с.
6. Лапина Т. И., Желанов А. Л. Проектирование информационных систем. М.: Университетская книга, 2022. 332 с.
7. Жилинский А. А. Самоучитель Microsoft SQL Server 2008. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 240 с.
8. Макфарланд Д. JavaScript и jQuery. Исчерпывающее руководство. 3-е изд. М.: Эксмо, 2017. 688 с.

9. Лапина Т. И., Малашин Н. С., Сапотько А. С. Подход к организации защиты информации в системах электронной коммерции // Будущее науки – 2021: сборник научных статей IX Международной молодежной научной конференции. Курск: Университетская книга, 2021. Т. 4. С. 207-214.

10. Прайс Дж. Oracle Database 11g: SQL. Операторы SQL и программы PL/SQL. М.: ЛОРИ, 2018. 660 с.

11. Лапина Т. И., Криушин Е. А. Анимации для web-приложении средствами JavaScript // Программная инженерия: современные тенденции развития и применения (ПИ-2021): сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2021. С. 138-149.

12. Дунаев В. В. Базы данных. Язык SQL для студента. М.: БХВ-Петербург, 2017. 288 с.

13. Управление доступом к информационным ресурсам в информационных системах / Т. И. Лапина, Э. М. Димов, Д. В. Лапин, Е. А. Петрик // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6, № 4 (23). С. 523-534.

14. Лапина Т. И., Лапин Д. В., Желанов А. Л. Подход к идентификации пользователей информационных ресурсов // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов и обработки изображений // Распознавание – 2019: сборник материалов XV Международной научно-технической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2019. С. 100-102.

15. Method of Authentication of Users of Mobile Devices / Т. I. Lapina, Е. А. Petric, D. V. Lapin, V. N. Nikolaev // International journal of soft computing. 2017. Vol 11, N 3. P. 198-202.

16. Построение систем мониторинга параметров случайных процессов / Т. И. Лапина, Д. В. Лапин, Е. А. Петрик, Е. А. Криушин // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6, № 4 (23). С. 484-493.

17. Лапина Т. И., Бондаренко А. А., Салехов Р. И. Построение интегрированной информационно-коммуникационной внутривузовской образовательной среды // Программная инженерия: современные тенденции развития и применения (ПИ-2021): сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2021. С. 95-103.

18. Кузнецов М. В., Симдянов И. В. Самоучитель РНР 7. СПб.: БХВ-Петербург, 2018. 448 с.

19. Лапина Т. И., Болычева С. А. Методика ранжированных показателей для определения инвестиционной привлекательности предприятия // Будущее науки – 2019: сборник научных статей VII Международной молодежной научной конференции. Курск: Университетская книга, 2019. С. 157-161.

20. Лапина Т. И., Болычева С. А. Оценка экономического потенциала предприятия для управления инвестициями // Будущее науки – 2019: сборник научных статей VII Международной молодежной научной конференции. Курск: Университетская книга, 2019. С. 152-156.

References

1. Gulyaev A. K., Machines V. A. Proektirovanie i dizain pol'zovatel'skogo interfeisa [Design and design of the user interface]. Moscow, Korona-Print Publ., 2010. 350 p.
2. Grinberg M. Razrabotka veb-prilozhenii s ispol'zovaniem Flask na yazyke Python [Development of web applications using Flask in Python]. Moscow, DMK Press Publ., 2016. 272 p.
3. Hassan G. UML. Proektirovanie sistem real'nogo vremeni, parallel'nykh i raspredelennykh prilozhenii [UML. Designing real-time systems, parallel and distributed applications]. Moscow, DMK Press Publ., 2016. 700 p.
4. Grekul V. I., Denishchenko G. N., Korovkin N. L. Upravlenie vnedreniem informatsionnykh sistem [Management of the implementation of information systems]. Moscow, Internet-Universitet Informatsionnykh tekhnologii; BINOM. Laboratoriya Znaniy Publ., 2014. 224 p.
5. Nixon R. Sozdaem dinamicheskie veb-saity s pomoshch'yu PHP, MySQL, JavaScript, CSS i HTML5 [Building dynamic websites with PHP, MySQL, JavaScript, CSS and HTML5]. 4th ed. St. Petersburg, Peter Publ., 2016. 768 p.
6. Lapina T. I., Zhelanov A. L. Proektirovanie informatsionnykh sistem [Design of information systems]. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2022. 332 p.
7. Zhilinsky A. A. Samouchitel' Microsoft SQL Server 2008 [Microsoft SQL Server 2008 Tutorial]. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2009. 240 p.
8. McFarland D. JavaScript i jQuery. Ischerpyvayushchee rukovodstvo [JavaScript and jQuery. Definitive guide]. 3rd ed. Moscow, Eksmo Publ., 2017. 688 p.
9. Lapina T. I., Malashin N. S., Sapotko A. S. [Approach to the organization of information security in e-commerce systems]. Budushchee nauki – 2021. Sbornik nauchnykh statei IX Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii [Future of Science. Collection of scientific articles of the 9th International Youth Scientific Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2021, vol. 4, pp. 207-214. (In Russ.)
10. Price J. Oracle Database 11g: SQL. Operatory SQL i programmy PL/SQL [Oracle Database 11g: SQL. SQL statements and PL/SQL programs]. Moscow, LORI Publ., 2018. 660 p.
11. Lapina T. I., Kriushin E. A. [Animations for a WEB application using JAVASCRIPT]. Programmnyaya inzheneriya: sovremennyye tendentsii razvitiya i primeneniya (PI-2021).

Sbornik materialov V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Software Engineering: Modern Trends in Development and Application (PI-2021). Collection of materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2021, pp. 138-149. (In Russ.)

12. Dunaev V. V. Bazy dannykh. Yazyk SQL dlya studenta [Databases. SQL language for student]. Moscow, BHV-Petersburg Publ., 2017. 288 p.

13. Lapina T. I., Dimov E. M., Lapin D. V. Petrik E. A. Upravlenie dostupom k informatsionnym resursam v informatsionnykh sistemakh [Access control to information resources in information systems]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technologies*, 2018, vol. 6, no. 4 (23), pp. 523-534.

14. Lapina T. I., Lapin D. V., Zhelanov A. L. [Approach to Identification of Users of Information Resources]. Optiko-elektronnye pribory i ustroystva v sistemakh raspoznavaniya obrazov i obrabotki izobrazhenii. Raspoznavanie – 2019. Sbornik materialov XV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii [Optoelectronic Devices and Devices in Pattern Recognition and Image Processing Systems. Recognition – 2019. Collection of materials of the XV International Scientific and Technical Conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2019, pp. 100-102. (In Russ.)

15. Lapina T. I., Petric E. A., Lapin D. V. Nikolaev V. N. Method of Authentication of Users of Mobile Devices. *International Journal of Soft Computing*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 198-202.

16. Lapina T. I., Lapin D. V. Petrik E. A. Kriushin E. A. Postroenie sistem monitoringa parametrov sluchainykh protsessov [Construction of systems for monitoring the parameters of random processes]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technologies*, 2018, vol. 6, no. 4 (23), pp. 484-493.

17. Lapina T. I., Bondarenko A. A., Salekhov R. I. [Building an integrated information and communication intra-university educational environment]. Programmaya inzheneriya: sovremennye tendentsii razvitiya i primeneniya (PI-2021). Sbornik materialov V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Software Engineering: Modern Trends in Development and Application (PI-2021). Collection of Materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2021, pp. 95-103. (In Russ.)

18. Kuznetsov M. V., Simdyanov I. V. Samouchitel' PHP 7 [Self-instruction manual PHP 7]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2018. 448 p.

19. Lapina T. I., Bolycheva S. A. [Methodology of ranked indicators for determining the investment attractiveness of an enterprise]. Budushchee nauki – 2019. Sbornik nauchnykh statei VII Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii [Future of Science – 2019. Collection of scientific articles of the 7th International Youth Scientific Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2019, pp. 157-161. (In Russ.)

20. Lapina T. I., Bolycheva S. A. [Assessment of the economic potential of an enterprise for investment management]. *Budushchee nauki – 2019. Sbornik nauchnykh statei VII Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii* [Future of Science – 2019. Collection of Scientific Articles of the 7th International Youth Scientific Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2019, pp. 152-156. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Лапина Татьяна Ивановна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: lapinati@mail.ru

Tatyana I. Lapina, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: lapinati@mail.ru

Сарычев Валентин Александрович, доктор технических наук, профессор, заместитель Генерального конструктора АО «НПП «Радар ммс», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: lapinati@mail.ru

Valentin A. Sarychev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Deputy General Designer of JSC Radar mms, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: lapinati@mail.ru

Цевка Виталий Юрьевич, студент кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: lapinati@mail.ru

Vitaliy Y. Tsevka, Student of the Department of Computer Science, Southwest State University, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: lapinati@mail.ru

Алгоритм оптимизации модели Войта в классификаторах функционального состояния живых систем

А. В. Мирошников¹ ✉, О. В. Шаталова¹, М. А. Ефремов¹, Н. С. Стадниченко¹,
А. Ю. Новоселов¹, А. В. Павленко¹

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

✉ e-mail: miron_22_91@mail.ru

Резюме

Цель исследования – разработка рекуррентного алгоритма оптимизации моделей Войта биоматериала, позволяющего получать наборы дескрипторов для классификаторов функционального состояния живых систем в интеллектуальных системах поддержки принятия решений по прогнозированию и диагностике социально значимых заболеваний.

Методы. Сущность предлагаемого метода заключается в использовании рекуррентной процедуры сравнения модели импеданса биоматериала, полученной на основе последовательно соединенных звеньев Войта, и результатов экспериментальных исследований. В процессе оптимизации модели Войта биоматериала, согласно предложенного метода, формируются пулы частот, на которых по результатам рекуррентной процедуры находятся оптимальные модели Войта по числу звеньев в модели. Затем по результатам интегральной ошибки выбирается оптимальное число звеньев модели, соответствующий этому числу оптимальный пул частот. Параметры модели Войта позволяют формировать дескрипторы для мультимодальных классификаторов функционального состояния живых систем и параметров звеньев модели.

Результаты. В качестве примера для апробации работы классификатора, построенного на основе алгоритма оптимизации модели Войта, была сформирована группа пациентов, больных пневмонией с четко поставленным диагнозом. Для получения сырых данных биоимпедансного анализа на грудную клетку пациентов надевался электродный пояс и определялись импедансные диаграммы, соответствующие определенному сочетанию электродов. Показатели качества различных моделей классификаторов достигали 0,78% и не опускались ниже 0,62%.

© Мирошников А. В., Шаталова О. В., Ефремов М. А., Стадниченко Н. С., Новоселов А. Ю., Павленко А. В., 2022

Заключение. Показано, что возможности многочастотного зондирования и нейросетевых моделей мультимодальных классификаторов позволяют получить новые решающие правила для диагностики патологических состояний организма (сердечно-сосудистые, инфекционные и онкологические заболевания).

Ключевые слова: инфекционные заболевания; модель биоимпеданса; многочастотное зондирование; обучаемый классификатор; итерационный алгоритм; обучающая выборка.

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

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90063.

Для цитирования: Алгоритм оптимизации модели Войта в классификаторах функционального состояния живых систем / А. В. Мирошников, О. В. Шаталова, М. А. Ефремов, Н. С. Стадниченко, А. Ю. Новоселов, А. В. Павленко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 2. С. 59–75. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-59-75>.

Поступила в редакцию 16.04.2022

Подписана в печать 14.05.2022

Опубликована 27.06.2022

Method for Classification of the Functional State of Living Systems Based on Recurrent Voigt Models

Andrey V. Miroshnikov¹ ✉, Olga V. Shatalova¹, Mikhail A. Efremov¹,
Nikita S. Stadnichenko¹, Alexey Yu. Novoselov¹, Andrey V. Pavlenko¹

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

✉ e-mail: miron_22_91@mail.ru

Abstract

Purpose of research is development of a recurrent algorithm for optimizing Voigt models of biomaterial, which allows obtaining sets of descriptors for classifiers of the functional state of living systems in intelligent decision support systems for predicting and diagnosing socially significant diseases.

Methods. The essence of the proposed method lies in the use of a recurrent procedure for comparing the biomaterial impedance model obtained on the basis of series-connected Voigt links and the results of experimental studies. In the process of optimizing the Voigt model of the biomaterial, according to the proposed method, frequency pools are formed, at which, according to the results of the recurrent procedure, the optimal Voigt models are found by the number of links in the model. Then, according to the results of the integral error, the optimal number of model links is selected, corresponding to this number, the optimal pool of frequencies. The parameters of the Voigt model make it possible to form descriptors for multimodal classifiers of the functional state of living systems and parameters of model links.

Results. As an example for testing the operation of the classifier built on the basis of the Voigt model optimization algorithm, a group of patients with pneumonia with a clear diagnosis was taken. To obtain raw bioimpedance analysis data, an electrode belt was put on the chest of patients and impedance diagrams were determined corresponding to a

certain combination of electrodes. The quality indicators of various classifier models reached 0,78% and did not fall below 0,62%

Conclusion. *It is shown that the capabilities of multi-frequency probing and neural network models of multimodal classifiers make it possible to obtain new decision rules for diagnosing pathological conditions of the body (cardiovascular, infectious and oncological diseases).*

Keywords: *infectious diseases; bioimpedance model; multifrequency sensing; trainable classifier; iterative algorithm; training sample.*

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

Funding: *The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90063.*

For citation: Miroshnikov A. V., Shatalova O. V., Efremov M. A., Stadnichenko N. S., Novoselov A. Yu., Pavlenko A. V. Method for Classification of the Functional State of Living Systems Based on Recurrent Voigt Models. *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.* 2022; 12(2): 59–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-59-75>.

Received 16.04.2022

Accepted 14.05.2022

Published 27.06.2022

Введение

Развитие систем интеллектуальной поддержки принятия врачебных решений (СППВР) на основе методов машинного обучения требует развития методологии моделирования живых объектов с целью получения дескрипторов – входных независимых переменных для СППВР, позволяющих адекватно идентифицировать функциональное состояние (ФС) живого объекта в настоящем и прогнозировать его будущее [1; 2; 3].

Одним из широко развивающихся направлений диагностики и прогнозирования ФС живых систем являются биоимпедансные исследования. Биоимпеданс является одним из релевантных предикторов изменения ФС живой системы, однако его величина, представленная компонентами действительной и мнимой составляющих, не отражает тон

ких структур изменений в биоматериале, т. е. не позволяет оценить изменения импеданса в его отдельных компонентах и сегментах. Для устранения этого недостатка биоимпедансных исследований используют многочастотное и многомерное зондирование [4; 5; 6; 7].

Материалы и методы

Биоимпеданс представляет собой внешнее интегральное проявление свойств живой системы, которые отражают определенным способом ее ФС. Для целей биоимпедансного анализа (БА) необходимо построить биоимпедансную модель живой системы, отражающую ее структурные элементы в виде совокупности пассивных или активных двухполюсников. Структура этой модели, построенная на основе моделей Войта, представлена ниже (рис. 1).

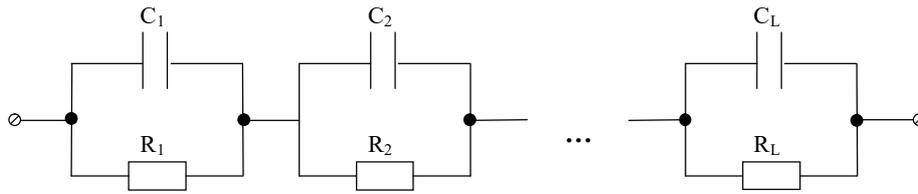


Рис. 1. Структура модели Войта [8; 9; 10; 11; 12; 13; 14]

Fig. 1. The structure of the Voigt model [8; 9; 10; 11; 12; 13; 14]

Модель состоит из последовательно соединенных звеньев параллельно соединенных конденсатора и емкости. Импеданс модели (одна точка на импедансной диаграмме при частоте ω) определяется согласно формуле

$$Z_{\text{VOIT}}(\omega) = \sum_{i=1}^{\ell} (R_i^{-1} + j\omega C_i)^{-1}, \quad (1)$$

где ℓ – число звеньев в модели Войта; R_i^{-1} – активная проводимость i -го звена модели Войта; $j\omega C_i$ – реактивная проводимость i -го звена модели Войта; $\omega \in \Omega$, Ω – множество частот зондирующего тока, на котором была получена импедансная диаграмма.

Для построения модели (1) был разработан рекуррентный алгоритм, который позволяет подобрать адекватную модель Войта как по числу звеньев в модели, так и по RC-параметрам звеньев. Алгоритм состоит из двух сегментов блоков, в первом из которых осуществляется оптимизация по параметрам модели, а во втором сегменте оптимизируется число звеньев в модели Войта. Для осуществления рекуррентного алгоритма загружается импедансная диаграмма, на основе которой строятся модели Войта биоматериала. Для расчета моделей Войта зададим вектора значе-

ний активного и реактивного сопротивлений биоматериал va и vb и вектор частот vf , на которых эти сопротивления были измерены. На рисунке 2 представлен пример ввода этих параметров импедансной диаграммы для двенадцати отсчетов частот.

$$vf := \begin{pmatrix} 1000 \\ 2000 \\ 3000 \\ 4000 \\ 5000 \\ 6000 \\ 7000 \\ 8000 \\ 9000 \\ 10000 \\ 11000 \\ 12000 \end{pmatrix} \quad va := \begin{pmatrix} 3000 \\ 3800 \\ 3300 \\ 3000 \\ 2600 \\ 2300 \\ 2100 \\ 1900 \\ 1800 \\ 1800 \\ 1600 \\ 1500 \end{pmatrix} \quad vb := \begin{pmatrix} -51800 \\ -36800 \\ -27700 \\ -21000 \\ -16700 \\ -13100 \\ -11100 \\ -9500 \\ -8100 \\ -7300 \\ -6600 \\ -6100 \end{pmatrix}$$

Рис. 2. Векторы vf , va , vb

Fig. 2. Vectors vf , va , vb

Учитывая то, что каждый частотный отсчет импедансной диаграммы дает два уравнения (1), а модель Войта начинает строиться с двух звеньев RC-двухполюсников, уже при отсчетах частоты в импедансной диаграмме более двух систем уравнений (рис. 3), которая соответствует уравнению (1) для двухзвен-

ной модели, становится переопределенной. В связи с этим приходится использовать различные сочетания частот. Каждое сочетание частот определяет свою систему нелинейных уравнений, что в результате приводит к множеству параметров: $\{R_k, C_k\}_i, k \in \overline{1, K}; i \in \overline{1, \ell}$. Число сочетания частот K может быть

определено как число сочетаний из N_j по ℓ , т. е.

$$K = C_{N_j}^{\ell} = \frac{N_j!}{\ell!(N_j - \ell)!}, \quad (2)$$

где N_j – число частотных отсчетов на импедансной диаграмме с номером j .

$$\begin{aligned} \frac{R1}{1 + (vf_i)^2 2\pi C1^2 R1^2} + \frac{R2}{1 + (vf_i)^2 2\pi C2^2 R2^2} &= va_i \\ \frac{-vf_i 2\pi C1 R1^2}{1 + (vf_i)^2 2\pi C1^2 R1^2} + \frac{-vf_i 2\pi C2 R2^2}{1 + (vf_i)^2 2\pi C2^2 R2^2} &= vb_i \\ \frac{R1}{1 + (vf_{i+1})^2 2\pi C1^2 R1^2} + \frac{R2}{1 + (vf_{i+1})^2 2\pi C2^2 R2^2} &= va_{i+1} \\ \frac{-vf_{i+1} 2\pi C1 R1^2}{1 + (vf_{i+1})^2 2\pi C1^2 R1^2} + \frac{-vf_{i+1} 2\pi C2 R2^2}{1 + (vf_{i+1})^2 2\pi C2^2 R2^2} &= vb_{i+1} \end{aligned}$$

Рис. 3. Система алгебраических уравнений для двухзвенной модели Войта, записанная для частот с номером i и номером $i+1$

Fig. 3. The system of algebraic equations for the two-link Voight model, written for frequencies with number i and number $i+1$

Однако при определённых значениях ℓ число сочетаний может быть неприемлемо велико. В этом случае пул частот, на основе которых строим модель Войта, выбирается согласно следующего алгоритма, работа которого иллюстрирует рисунок 4. Модель начинаем строить с двух звеньев, для вычисления параметров которой достаточно четырех уравнений, т. е. двух частот. Шкалу частот аппроксимируем кривой (рис. 5) как в виде функции номера отсчета частоты. Для двухзвенной модели

выбираем две крайние точки – \max и \min . Если добавляется еще одно звено, то частотный диапазон делится пополам и выбирается частота, соответствующая середине этого диапазона. Определяется точка пересечения абсциссы середины диапазона ω_1 с кусочно аппроксимированной шкалой частот (точка A1 на шкале частот), и из этой точки опускается перпендикуляр на ось абсцисс. Определяем ближайший номер отсчета к точке пересечения перпендикуляром оси абсцисс и включаем соответствующую

частоту в пул частот для этой модели. Для следующей модели поступаем аналогичным образом, выбирая частоты ω_2 или ω_3 и соответствующие им точки A2 и A3. Строим модель Войта для этих двух сочетаний частот, и параметры модели Войта выбираются исходя из минимальной ошибки. Такой процесс можем продолжать до достижения числа звеньев модели Войта числу отсчетов частот на импедансной диаграмме (на шкале частот, рис. 5). Затем осуществляем оптимизацию модели по пулам отсчетов частот. Для оптимизации необходимо по найденным параметрам модели Войта аппроксимировать импедансную диаграмму и определить ошибку ап-

проксимации ϵ , которая зависит от ошибок аппроксимации на каждой частоте импедансной диаграммы.

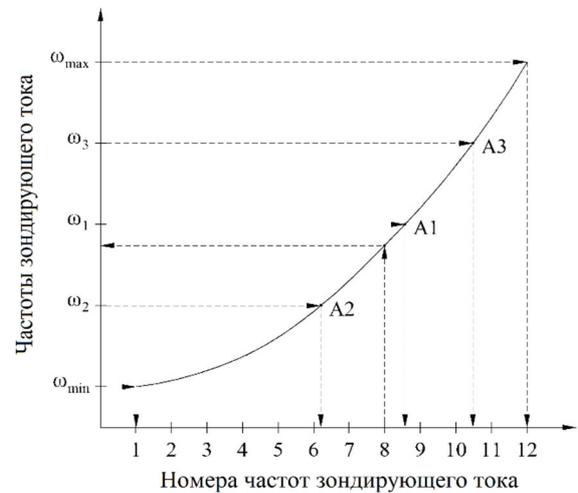


Рис. 4. Методика выбора пула частот

Fig. 4. Frequency pool selection methodology

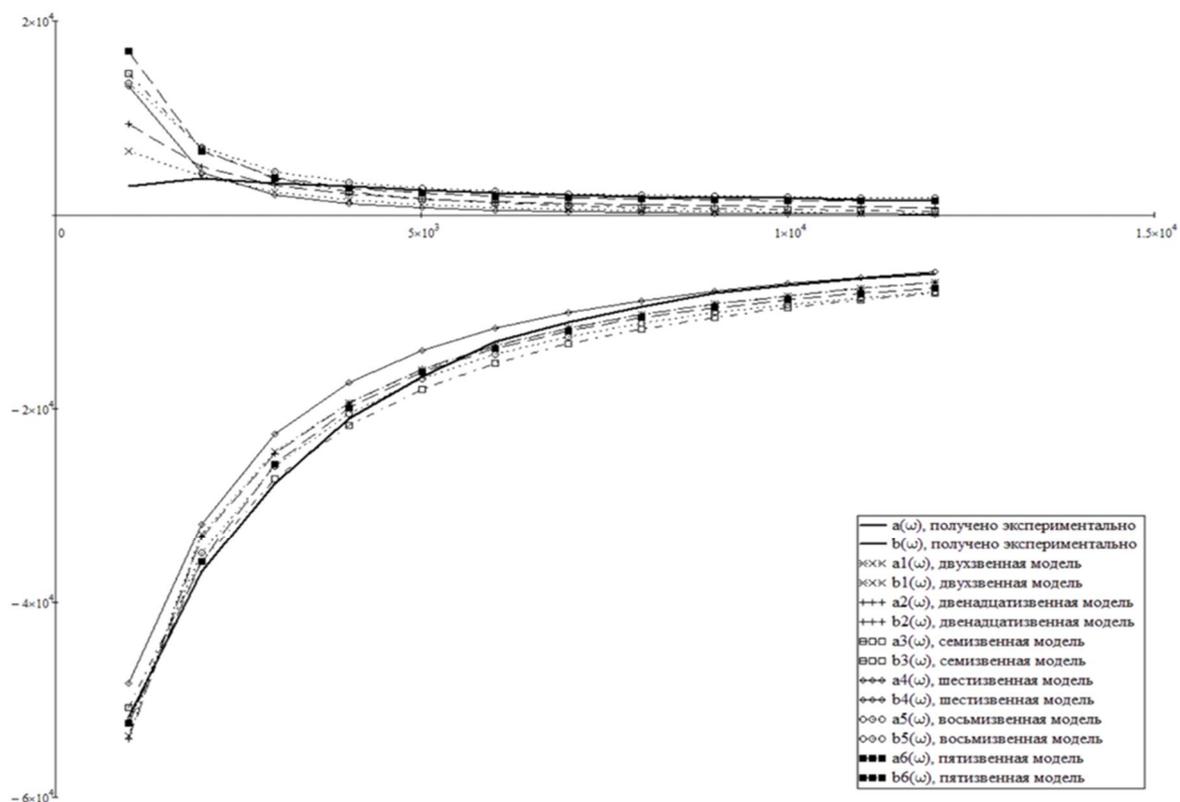


Рис. 5. Аппроксимация реальной и мнимой компонент импедансной диаграммы биоматериала моделями Войта с различной структурой

Fig. 5. Approximation of the real and imaginary components of the biomaterial impedance diagram by Voigt models with different structures

Модель Войта начинаем строить с двух звеньев. Затем число звеньев увеличивается. Процесс наращивания звеньев в модели Войта можем остановить двумя способами. Если ошибка аппроксимации импедансной диаграммы моделью Войта задана, то процесс наращивания звеньев модели заканчивается при достижении ошибки пороговой величины. Если же ошибка не задана, то число звеньев в модели Войта ограничено числом отсчетов в импедансной диаграмме.

Из формулы (1) и рисунка 1 следует, что каждое звено дает одно комплексное нелинейное уравнение (1). Комплексное уравнение (1) разлагается на два уравнения с действительными коэффициентами, которые имеют 2ℓ неизвестных, где ℓ – число звеньев в модели Войта. Один отсчет частоты на импедансной диаграмме соответствует двум неизвестным параметрам двухполюсника в модели Войта. Таким образом, мы можем в модели Войта использовать столько звеньев, сколько отсчетов имеется на импедансной диаграмме. Если на импедансной диаграмме много частотных отсчетов, а это как правило, то система нелинейных уравнений, построенная согласно уравнению (1), является переопределенной, это требует разработку методов оптимизации модели не только по числу звеньев в модели, но и по параметрам, так как в зависимости от сочетания используемых частот в импедансной диаграмме мы получаем различные РС-параметры звеньев модели.

На рисунке 5 представлены компоненты исходной импедансной диаграммы (сплошная линия) и аппроксимирующие их графики, соответствующие различным моделям Войта (штриховые линии). На рисунке 6 представлен сегмент аппроксимации импедансной диаграммы биоматериала моделями Войта с различной структурой в области частот, соответствующих экспериментальным данным

Ошибки на каждой n -й частоте импедансной диаграммы определяются как

$$\begin{aligned}\Delta \operatorname{Re}(n, \ell) &= \operatorname{Re}(n) - \overline{\operatorname{Re}}(n, \ell), \\ \Delta \operatorname{Im}(n, \ell) &= \operatorname{Im}(n) - \overline{\operatorname{Im}}(n, \ell),\end{aligned}\quad (2)$$

где составляющие импеданса, полученные посредством модели Войта, имеют идентификаторы с верхней чертой.

Общая ошибка аппроксимации ℓ -й модели Войта определяется как сумма векторов ошибок на каждом отсчете частот:

$$\varepsilon(\ell) = \sum_{n=1}^N \sqrt{(\Delta \operatorname{Re}(n, \ell))^2 + (\Delta \operatorname{Im}(n, \ell))^2}. \quad (3)$$

Относительная ошибка модели определяется как

$$\begin{aligned}\varepsilon^*(\ell) &= \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{\sqrt{(\Delta \operatorname{Re}(n, \ell))^2 + (\Delta \operatorname{Im}(n, \ell))^2}}{\sqrt{(\operatorname{Re}(n, \ell))^2 + (\operatorname{Im}(n, \ell))^2}}.\end{aligned}\quad (4)$$

На рисунке 6 представлен график ошибок аппроксимации моделей Войта, определяемых по формуле (4), которые ранжированы по числу звеньев моделей Войта. Если в качестве критерия адекватности модели использовать значения

реальной составляющей импеданса на нулевой частоте (на постоянном токе), то анализ импедансных диаграмм, представленных на рисунке 6, показывает, что этот показатель адекватности не связан пропорциональной зависимостью с числом звеньев модели Войта. Это об-

стоятельство указывает на то, что для повышения адекватности модели необходимо на графике Коула иметь частотный отсчет при частоте, равной нулю (самая правая точка на импедансной диаграмме).

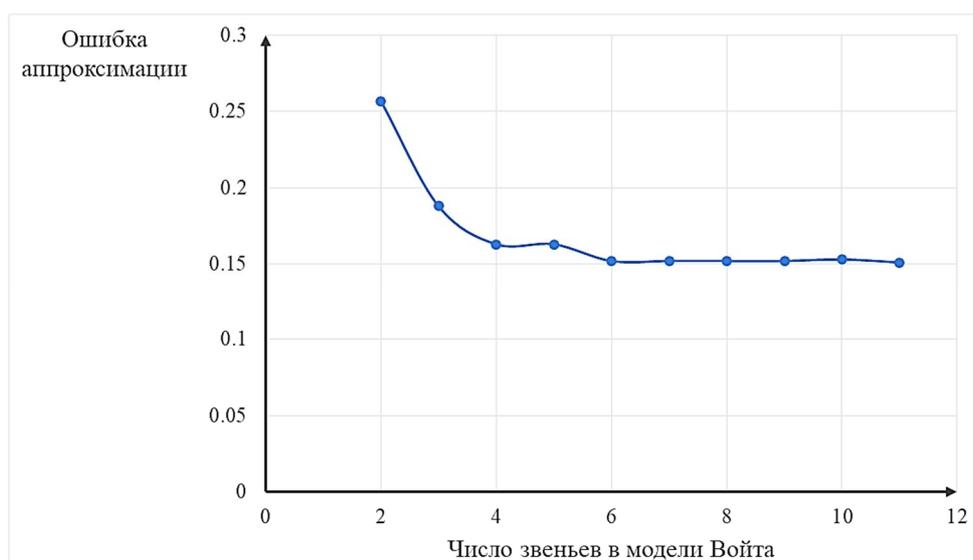


Рис. 6. График зависимости ошибки аппроксимации импедансной диаграммы от числа звеньев в модели Войта

Fig. 6. Graph of the dependence of the impedance diagram approximation error on the number of links in the Voight model

График на рисунке 6 показывает, что, начиная от шести звеньев, дальнейшее увеличение их количества не приводит к заметному уменьшению ошибки, т. е. устанавливается плато ошибки, что позволяет не включать процедуру оптимизации числа звеньев в модели Войта, а выбирать их число в начале плато ошибки аппроксимации.

Результаты и их обсуждение

Для апробации метода формирования дескрипторов с использованием предложенного алгоритма был проведен

ряд исследований по измерению биоимпеданса у группы пациентов больных острой респираторной вирусной инфекцией (ОРВИ) (группа X1) и у той же группы, но спустя один месяц после завершения лечения (группа X2).

Полученные значения импедансных диаграмм отображены на рисунке 7 и рисунке 8. Для анализа полученных данных были использованы методы многомерного сопоставления данных и построение гистограмм распределения частоты появления определенного значения импеданса на установленной частоте зондирующего тока, а также метод

дисперсного анализа [15]. Для исключения ошибок полученные данные были проверены на нормальное распределение, после чего был вычислен интервал отклонения значений $\pm 2\sigma$, в диапазоне которого данные можно считать достоверными. Для построения гистограмм распределения частоты появления определенного значения импеданса измеренные значения были разбиты на диапазоны, количество которых было определено по формуле Стерджеса.

Проведенный дисперсный анализ показал, что на низких частотах (до 5 кГц) и на высоких частотах (выше 14 кГц) нулевая гипотеза для статистической выборки значений для групп выздоровевших (группа X2) и больных ОРВИ (группа X1) незначима на уровне 0,01. С другой стороны, в середине диапазона частот (в диапазоне от 5 кГц до 12 кГц) нулевая гипотеза значима на уровне 0,06.

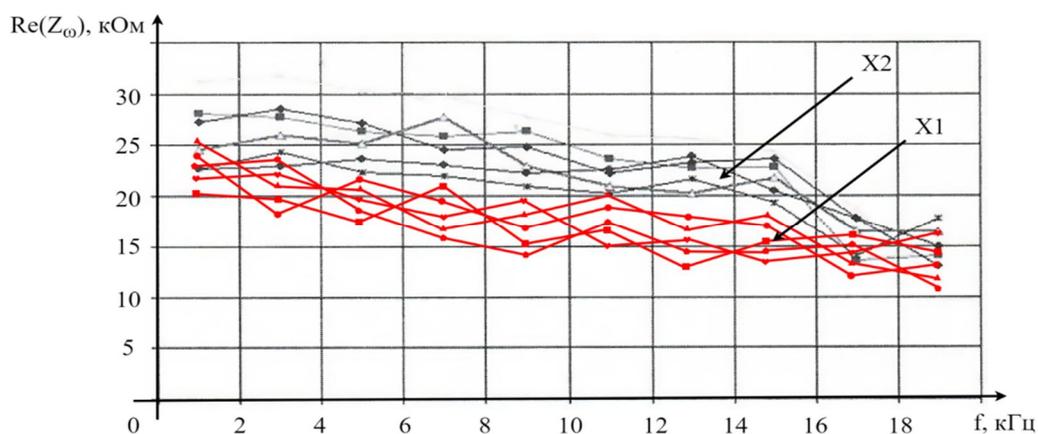


Рис. 7. Графики зависимости действительной части импеданса от частоты зондирующего тока у группы X1 и X2

Fig. 7. Graphs of the dependence of the real part of the impedance on the frequency of the probing current for groups X1 and X2

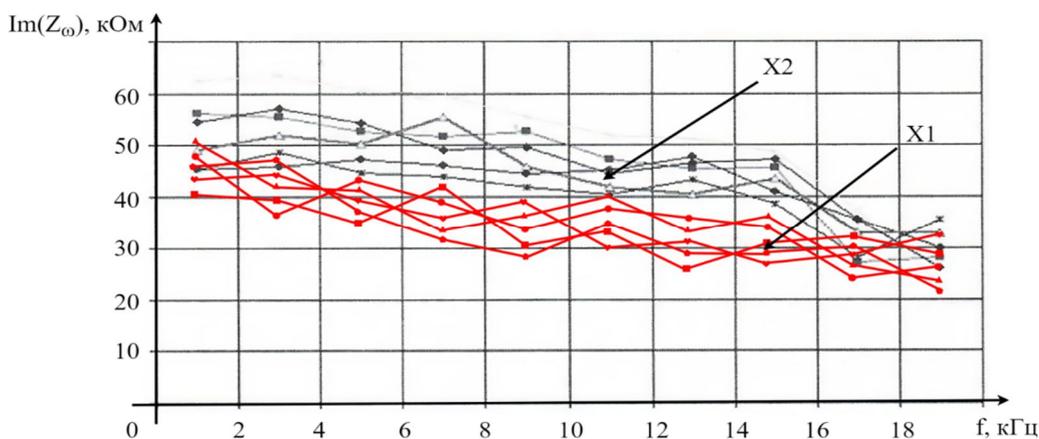


Рис. 8. Графики зависимости мнимой части импеданса от частоты зондирующего тока у группы X1 и X2

Fig. 8. Graphs of the dependence of the imaginary part of the impedance on the frequency of the probing current for groups X1 and X2

Таким образом, можно утверждать, что отличие измеренных значений импеданса для группы больных людей от группы здоровых на частотах зондирующего тока от 5 кГц до 12 кГц свидетельствует о наличии патологии. Исходя из полученных результатов были построены классификаторы, позволяющие однозначно идентифицировать наличие патологии, а также дающие возможность исследовать зависимости импеданса биологической ткани от частоты зондирующего тока для различных вирусных инфекций

Для построения классификатора по найденным дескрипторам $\{R_i C_i\}$ используем обучаемые нейронные сети с иерархической структурой [16; 17; 18]. На первом иерархическом уровне имеем $N/2$ нейронных сетей, каждая из которых имеет один выход и $\ell \times 2$ входов. Выход нейронной сети первого иерархического уровня показывает уверенность в принадлежности биоматериала к классу функционального состояния, на который была обучена нейронная сеть. Нейронные сети первого иерархического уровня обучаются по одним и тем же обучающим выборкам. Выходы нейронных сетей лежат в диапазоне от нуля до единицы. На втором иерархическом уровне имеется только одна нейронная сеть с одним выходом и числом входов, равным числу нейронных сетей на первом иерархическом уровне. Выход нейронной сети показывает уве-

ренность в принадлежности биоматериала к классу функционального состояния, на который была обучена нейронная сеть. Выход нейронной сети лежит в диапазоне от нуля до единицы. При этом классификация ведется по двум классам – «класс интереса» и класс «все остальное».

В качестве примера для апробации работы классификатора была взята группа пациентов, больных вирусной пневмонией с четко поставленным диагнозом (рентгенография, рентгеновская томография, данные лабораторного анализа) и группа волонтеров без легочных патологий. Диагнозы кодируются символами «0» и «1». Для получения сырых данных биоимпедансного анализа на грудную клетку пациентов надевался электродный пояс и определялись импедансные диаграммы, соответствующие определенному сочетанию электродов. Таким образом, получаем матрицу дескрипторов с размерностью $\ell \times N/2$, где N – число электродов в электродном поясе [8; 11].

Из полученной обучающей выборки методом скользящего экзамена формируются контрольные выборки. Показатели качества диагностики классификаторов, построенных по иерархической структуре, по классам «пневмония» – «нет пневмонии» для контрольных выборок оцениваются на основе анализа ошибок первого и второго рода или на основе ROC-анализа, для трех моделей Войта представлены на диаграммах ри-

сунка 9. Модели отличались размерностями входного вектора, которые определялись числом звеньев в моделях Войта импеданса биоматериала. Число звеньев в модели Войта определялось

ошибкой аппроксимации импедансных диаграмм или априорно заданным предельным значением числа звеньев в модели Войта.

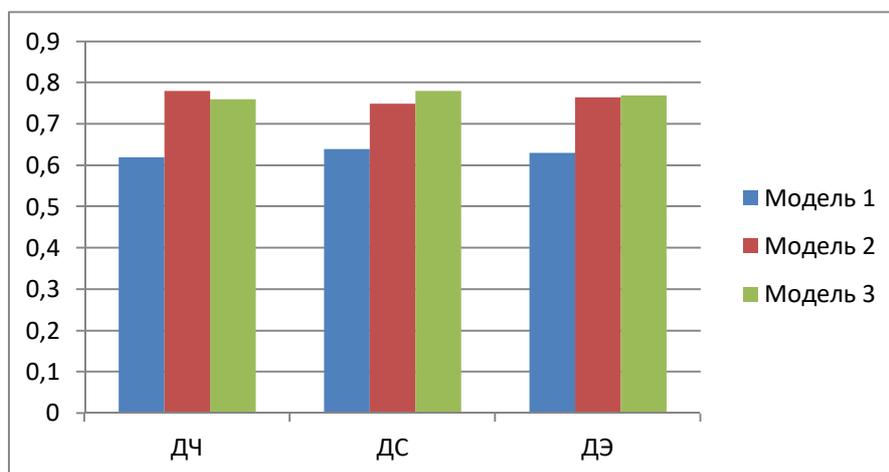


Рис. 9. Показатели качества диагностики пневмонии на контрольных выборках для различных моделей Войта

Fig. 9. Pneumonia diagnosis quality indicators on control samples for different Voight models

Для определения качества классификации использовались известные показатели качества: диагностическая чувствительность (ДЧ), диагностическая специфичность (ДС) и диагностическая эффективность (ДЭ) [19; 20]. Показатели качества различных моделей классификаторов достигали 0,78% и не опускались ниже 0,62%.

Выводы

В результате проведения исследования получены результаты, позволяющие создать интеллектуальные системы поддержки принятия решений по прогнозированию и диагностике социально значимых заболеваний. Возможности многочастотного зондирования и нейросете-

вых моделей мультимодальных классификаторов позволят получить новые решающие правила для диагностики патологических состояний организма (сердечно-сосудистые, инфекционные и онкологические заболевания).

Разработан рекуррентный алгоритм оптимизации моделей Войта биоматериала. Алгоритм основан на результатах биоимпедансного анализа, представленных в виде графиков Коула. Алгоритм отличается использованием рекуррентной процедуры сравнения модели импеданса биоматериала, полученной на основе последовательно соединенных звеньев Войта, и результатов экспериментальных исследований, а также методикой формирования пулов частот для построения модели Войта биоматериала. В

процессе оптимизации модели Войта биоматериала, согласно предложенной методике, формируются пулы частот, на которых по результатам рекуррентной процедуры находятся оптимальные модели Войта по числу звеньев в модели. Затем по результатам интегральной ошибки выбирается оптимальное число звеньев модели, соответствующий этому

числу оптимальный пул частот. Параметры модели Войта позволяют формировать дескрипторы для мультимодальных классификаторов функционального состояния живых систем, обеспечивающие показатели качества классификации на контрольных выборках по классам «пневмония» – «нет пневмонии» не ниже 0,62%.

Список литературы

1. Модель формирования функциональных систем с учетом менеджмента адаптационного потенциала / С. А. Филист, А. Н. Шуткин, Е. С. Шкатова, С. В. Дегтярев, Д. Ю. Савинов // Биотехносфера. 2018. № 1(55). С.32-37.
2. Нейросетевые модули с виртуальными потоками для классификации и прогнозирования функционального состояния сложных систем / А. В. Киселев, Т. В. Петрова, С. В. Дегтярев, А. Ф. Рыбочкин, С. А. Филист, О. В. Шаталова, В. Н. Мишустин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. № 4 (79). С. 123-134.
3. Шаталова О. В. Интеллектуальные системы мониторинга медицинских рисков с учетом биоимпедансных исследований / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2020. 356 с.
4. Попечителей Е. П., Филист С. А. Способы и модели идентификации биоматериалов на основе анализа многочастотного импеданса // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника. Медицинское приборостроение. 2011. № 1. С. 74-80.
5. Шаталова О. В. Итерационная многопараметрическая модель биоимпеданса в экспериментах *in vivo* // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 1 (30). С. 26-38.
6. Параметрические модели биоимпеданса для идентификации функционального состояния живой системы / К. Д. А. Кассим, И. А. Ключиков, О. В. Шаталова, З. Д. Яа // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 50-56.
7. Филист С. А., Кузьмин А. А., Кузьмина М. Н. Биотехническая система для контроля импеданса биоматериалов в экспериментах *in vivo* // Биомедицинская радиоэлектроника. 2014. № 9. С. 38-42.
8. Модели биоматериала для формирования дескрипторов в интеллектуальных системах диагностики инфекционных заболеваний / А. В. Мирошников, Н. С. Стадниченко, О. В. Шаталова, С. А. Филист // Моделирование, оптимизация и информа-

ционные технологии. Научный журнал. 2020. Т. 7, № 1. С. 1-14. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.018>.

9. Miroshnikov A. V., Shatalova O. V., Zhilin V. V. Biomaterial impedance model for medical risk classifiers in in vivo experiments // Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference Artificial Intelligence and Digital Technologies in Technical Systems, 2020. P. 012045.

10. Iterative models of bioimpedance in intelligent systems for early diagnosis of infectious diseases / A. V. Miroshnikov, A. V. Kiselev, O. V. Shatalova, R. A. Krupchatnikov // CEUR Workshop Proceedings. ITIDMS 2021 – Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems", 2021. P 25.

11. Классификации биологических объектов на основе многомерного биоимпедансного анализа / А. В. Мирошников, О. В. Шаталова, Н. С. Стадниченко, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 29-49.

12. Буянова Е. С., Емельянова Ю. В. Импедансная спектроскопия электролитических материалов. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2008. 70 с.

13. Пат. 2752594 Российская Федерация, МПК А 61 В 5/00. Способ классификации биологических объектов на основе многомерного биоимпедансного анализа и устройство для его реализации / Филист С. А., Шаталова О. В., Протасова З. У., Стадниченко Н. С. № 2020115879; заявл. 15.05.20; опубл. 29.07.21, Бюл. № 22.

14. Application of Fuzzy Neural Model and Current-Voltage Analysis of Biologically Active Points for Prediction Post-Surgery Risks / O. V. Shatalova, S. A. Filist, Z. U. Protasova, N. A. Korenevskiy, R. T. Al-Kasasbeh [et. al.] // Computer Method in Biomedical Engineering. 2021. Vol. 24. P. 1504-1516. <https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1895128>.

15. Симчера В. М. Методы многомерного анализа статистических данных. М.: Финансы и статистика, 2008. 400 с.

16. Филист С. А., Алексенко В. А., Кабус Кассим. Гибридные информационные технологии по экспресс-диагностике инфекционных заболеваний на основе многочастотного анализа пассивных свойств биотканей // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск. Медицинские информационные системы. 2010. № 8(109). С. 12-17.

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

18. Филист С. А., Шаталова О. В., Ефремов М. А. Гибридная нейронная сеть с макрослоями для медицинских приложений // Нейрокомпьютеры. Разработка и применение. 2014. № 6. С. 35-39.

19. Hybrid neural networks with virtual flows in in medical risk classifiers / K. Khatatneh, S. Filist, R. T. Al-Kasasbeh, A. A. Aikeyeva, M. Namazov, O. Shatalova, A. Shaqadan, A. Miroshnikov // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. 2022. N 43. P. 1621–1632. <https://doi.org/10.3233/JIFS-212617>.

20. Системы поддержки принятия решений в кардиологической области. Обзор / Д. А. Медников, З. У. Протасова, О. В. Шаталова, А. В. Серебровский // Медико-экологические информационные технологии – 2021: сборник научных статей по материалам XXIV Международной научно-технической конференции (20-21 мая 2021 г.) / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2021. С. 178-188.

References

1. Filist S. A., Shutkin A. N., Shkatova E. S., Degtyarev S. V., Savinov D. Yu. Model' formirovaniya funktsional'nyh sistem s uchetom menedzhmenta adaptatsionnogo potentsiala [Model of the formation of functional systems taking into account the management of adaptive potential]. *Biotekhnosfera = Biotechnosphere*, 2018, no. 1(55), pp. 32-37.

2. Kiselev A. V., Petrova T. V., Degtyarev S. V., Rybochkin A. F., Filist S. A., Shatalova O. V., Mishustin V. N. Neyrosetevye moduli s virtual'nymi potokami dlya klassifikatsii i prognozirovaniya funktsional'nogo sostoyaniya slozhnyh sistem [Neural network modules with virtual flows for classifying and predicting the functional state of complex systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of Southwest State University*, 2018, no. 4(79), pp. 123-134.

3. Shatalova O. V. Intellektual'nye sistemy monitoringa meditsinskih riskov s uchetom bioimpedansnyh issledovaniy [Intelligent monitoring systems for medical risks taking into account bioimpedance studies]. Kursk, Southwest State University Publ., 2020. 356 p.

4. Popechitelev E. P., Filist S. A. Sposoby i modeli identifikatsii biomaterialov na osnove analiza mnogochastotnogo impedansa [Methods and models for identification of biomaterials based on multifrequency impedance analysis]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2011, no. 1, pp. 74-80.

5. Shatalova O. V. Iteratsionnaya mnogoparametricheskaya model' bioimpedansa v eksperimentah in vivo [Iterative multiparameter bioimpedance model in in vivo experiments]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of Southwest State*

university. Series Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering, 2019, no. 9(1), pp. 26-38.

6. Kassim K. D. A., Klyuchikov I. A., Shatalova O. V., Yaa Z. D. Parametricheskie modeli bioimpedansa dlya identifikatsii funktsional'nogo sostoyaniya zhivoy sistemy [Parametric bioimpedance models for identifying the functional state of a living system]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2012, no. 4, pp. 50-56.

7. Filist S. A., Kuzmin A. A., Kuzmina M. N. Biotekhnicheskaya sistema dlya kontrolya impedansa biomaterialov v eksperimentah in vivo [Biotechnical system for controlling the impedance of biomaterials in in vivo experiments]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*. 2014, no. 9, pp. 38-42.

8. Miroshnikov A. V., Stadnichenko N. S., Shatalova O. V., Filist S. A. Modeli biomateriala dlya formirovaniya deskriptorov v intellektual'nyh sistemah diagnostiki infektsionnyh zabolevaniy [Biomaterial models for the formation of descriptors in intelligent systems for diagnosing infectious diseases]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. Nauchnyy zhurnal = Modeling, Optimization and Information Technology. Science Magazine*, 2020, vol. 7, no. 1, pp. 1-14. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.018>

9. Miroshnikov A. V., O Shatalova. V., Zhilin V. V. Biomaterial impedance model for medical risk classifiers in in vivo experiments. *Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference Artificial Intelligence and Digital Technologies in Technical Systems*, 2020. P. 012045.

10. Miroshnikov A. V., Kiselev A. V., Shatalova O. V., Krupchatnikov R. A. Iterative models of bioimpedance in intelligent systems for early diagnosis of infectious diseases. *CEUR Workshop Proceedings. ITIDMS 2021 – Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems"*, 2021, p. 25.

11. Miroshnikov A. V., Shatalova O. V., Stadnichenko N. S., Shulga L. V. Klassifikatsii biologicheskikh ob"ektov na osnove mnogomernogo bioimpedansnogo analiza [Classification of biological objects based on multidimensional bioimpedance analysis]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2020, vol. 10, no. 3/4, pp. 29-49.

12. Buyanova E. S., Emel'yanova Y. V. Impedansnaya spektroskopiya elektroliticheskikh materialov [Impedance spectroscopy of electrolytic materials]. Ekaterinburg, Ural State University Publ., 2008. 70 p.

13. Filist S. A., Shatalova O. V., Protasova Z. U., Stadnichenko N. S. Sposob klassifikatsii biologicheskikh ob"ektov na osnove mnogomernogo bioimpedansnogo analiza i ustroystvo

dlya ego realizatsii [Method for solving biological objects based on multidimensional bioimpedance analysis and devices for implementation]. Patent RF, no. 2752594, 2021.

14. Shatalova O. V., Filist S. A., Protasova Z. U., Korenevskiy N. A., Al-Kasasbeh R. T., eds. Application of Fuzzy Neural Model and Current-Voltage Analysis of Biologically Active Points for Prediction Post-Surgery Risks. *Computer Method in Biomedical Engineering*, 2021, vol. 24, pp. 1504-1516. <https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1895128>

15. Simchera V. M. Metody mnogomernogo analiza statisticheskikh dannykh [Methods for Multivariate Analysis of Statistical Data: A Tutorial]. Moscow, Finance and statistics Publ., 2008. 400 p.

16. Filist S. A., Aleksenko V. A., Kassim Kabus. Gibridnye informatsionnye tekhnologii po ekspress-diagnostike infektsionnykh zabolevaniy na osnove mnogochastotnogo analiza passivnykh svoystv biotkaney [Hybrid information technologies for express diagnostics of infectious diseases based on multifrequency analysis of passive properties of biological tissues]. *Izvestiya Yuzhnogo Federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. Tematicheskii vypusk. Meditsinskie informatsionnye sistemy = Proceedings Southern Federal University. Technical Science. Thematic Issue. Medical Information Systems*, 2010, no. 8(109), pp. 12-17.

17. Surzhikova S. E., Filist S. A., Zhilin V. V., Kurochkin A. G. Ispol'zovanie gibridnykh neyrosetevykh modeley dlya mnogoagentnykh sistem klassifikatsii v geterogennom prostranstve informativnykh priznakov [Using hybrid neural network models for multi-agent classification systems in a heterogeneous space of informative features]. *Prikaspijskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2015, no. 3, pp. 85-95.

18. Filist S. A., Shatalova O. V., Efremov M. A. Gibridnaya neyronnaya set' s makrosloyami dlya meditsinskih prilozheniy [Hybrid neural network with macro layers for medical applications]. *Neyrokomp'yutery. Razrabotka i primeneniye = Neurocomputers. Development and Application*, 2014, no. 6, pp. 35-39.

19. Khatatneh K., Filist S., Al-Kasasbeh R. T., Aikeyeva A. A., Namazov M., Shatalova O., Shaqadan A., Miroshnikov A. Hybrid neural networks with virtual flows in in medical risk classifiers. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2022, no. 43, pp. 1621–1632. <https://doi.org/10.3233/JIFS-212617>

20. Mednikov D. A., Protasova Z. U., Shatalova O. V., Serebrovskiy A. V. [Decision support systems in the cardiology field. Review]. *Mediko-ekologicheskie informatsionnye tekhnologii – 2021. Sbornik nauchnykh statey po materialam XXIV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (20-21 maya 2021 g.) [Medical and environmental information technologies – 2021. Collection of scientific articles based on the materials of the XXIV International Scientific and Technical Conference (May 20-21, 2021)]*. Kursk, Southwest State University Publ., 2021, pp. 178-188. (In Russ).

Информация об авторах / Information about the Authors

Мирошников Андрей Валерьевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: miron_22_91@mail.ru

Andrey V. Miroshnikov, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: miron_22_91@mail.ru

Шаталова Ольга Владимировна, доктор технических наук, доцент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Shatolg@mail.ru

Olga V. Shatalova, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: Shatolg@mail.ru

Ефремов Михаил Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: efremov_ma@mail.ru

Mikhail A. Efremov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Information Security, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: efremov_ma@mail.ru

Стадниченко Никита Сергеевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: stadnikita@gmail.com

Nikita S. Stadnichenko, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: stadnikita@gmail.com

Новоселов Алексей Юрьевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация

Alexey Y. Novoselov, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation

Павленко Андрей Витальевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dren-x@yandex.ru

Andrey V. Pavlenko, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dren-x@yandex.ru

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-76-97>



Многопоточная архитектура программного обеспечения обработки многоканальных медицинских сигналов

М. Б. Мяснянкин¹, А. А. Кузьмин¹ ✉, В. В. Серебровский¹, Е. А. Алдохин¹

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

✉ e-mail: Ku3bmin@gmail.com

Резюме

Цель исследования – разработка метода обработки и графического отображения многоканальных медицинских сигналов в квазиреальном времени.

Методы. Метод предполагает сегментацию программы на легко используемые, дополняемые и изменяемые модули-классы, которые объединены в общую иерархию с использованием объектно ориентированных принципов наследования, что позволяет строить системы регистрации медицинских сигналов любой сложности. Метод основан на дроблении общего вычислительного процесса на определенные стадии, называемые ступенями. На каждую ступень выделяется отдельная часть аппаратных средств, а между ступенями организуется процесс передачи входных-выходных данных. Совокупность ступеней представляет собой конвейер для обработки данных.

Предложенная архитектура системы обработки медицинских сигналов позволяет осуществлять конвейерную многопоточную обработку многоканальных медицинских сигналов, что повышает эффективность использования многоядерных вычислительных платформ.

Результаты. На основе предложенного метода разработана модульная структура программного обеспечения обработки медицинских сигналов для многоканальной системы сбора данных. Обработка данных в ступенях-обработчиках конвейера включает в себя такие типичные операции, как запись данных на жесткий диск или в отдельный буфер памяти, фильтрация сигнала – удаление постоянной составляющей или подавление определенного спектра частот, вычисление диагностических показателей сигнала, анализ полученных показателей, принятие решений и т. п. Согласно предложенной модульной структуре разработано программное обеспечение обработки многоканальных медицинских сигналов в реальном времени.

Заключение. В ходе проведенного исследования было разработано программное обеспечение обработки многоканальных медицинских сигналов в реальном времени. Разработан метод, позволяющий сегментировать программу на легко используемые, дополняемые и изменяемые модули-классы, которые объединены в общую иерархию с использованием объектно ориентированных принципов наследования.

Ключевые слова: многоканальные медицинские сигналы; многопоточные системы; архитектура системы обработки медицинских сигналов; обработка данных в реальном времени.

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

© Мяснянкин М. Б., Кузьмин А. А., Серебровский В. В., Алдохин Е. А., 2022

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90058.

Для цитирования: Многопоточная архитектура программного обеспечения обработки многоканальных медицинских сигналов / А. А. Кузьмин, М. Б. Мяснянкин, В. В. Серебровский, Е. А. Алдохин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 2. С. 76–97. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-76-97>.

Поступила в редакцию 11.04.2022

Подписана в печать 05.05.2022

Опубликована 27.06.2022

Multithread Software Architecture for Processing Multichannel Medical Signals

Maksim B. Myasnyankin¹, Alexander A. Kuzmin¹ ✉, Vadim V. Serebrovsky¹, Evgeny A. Aldokhin¹

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

✉ e-mail: Ku3bmin@gmail.com

Abstract

The purpose of research is development of a method for processing and graphical display of multichannel medical signals in quasi-real time.

Methods. The method assumes segmentation of the program into easily used class modules, which are combined into a common hierarchy using object-oriented inheritance principles. It allows building medical signal registration systems of wide complexity. The method is based on the division of the general computational process into certain stages, called steps. A separate part of the hardware is allocated for each stage, and the process of transferring input-output data is organized between the stages. The set of steps is a pipeline for data processing.

The proposed architecture of the medical signal processing system allows pipelined multi-threaded processing of multichannel medical signals, which increases the efficiency of using multi-core computing platforms.

Results. Based on the proposed method, a modular structure of medical signal processing software for a multichannel data acquisition system was developed. Data processing in pipeline processing stages includes such typical operations as writing data to a hard disk or to a separate memory buffer, signal filtering - removing a constant component or suppressing a certain frequency spectrum, calculating signal diagnostic indicators, analyzing the obtained indicators, making decisions, and etc. According to the proposed modular structure, software for processing multichannel medical signals in real time has been developed.

Conclusion. In the course of the study, software for processing multichannel medical signals in real time was developed. A method has been developed that allows the program to be segmented into easily used class modules, which are combined into a common hierarchy using object-oriented inheritance principles.

Keywords: multichannel medical signals; multithreaded systems; medical signal processing system architecture; real-time data processing.

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

Funding: The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90058.

For citation: Myasnyankin M. B., Kuzmin A. A., Serebrovsky V. V., Aldokhin E. A. Multithread Software Architecture for Processing Multichannel Medical Signals. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2022; 12(2): 76–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-76-97>.

Received 11.04.2022

Accepted 05.05.2022

Published 27.06.2022

Введение

В настоящее время в системах поддержки принятия врачебных решений широко применяется интерактивный режим, обеспечивающий совместную работу врача и компьютера. Режим обеспечивается посредством интерфейсных окон, основная задача которых – обеспечить обмен информацией между компьютером и пользователем. Данные от компьютера должны поступать к пользователю в форме, которая позволяет легко их воспринимать и интерпретировать. Известно достаточно много таких алгоритмических и программных решений [1; 2; 3].

Процесс сбора данных в программном обеспечении систем обработки медицинских сигналов можно разделить на несколько этапов: обмен данными с источником данных, запись данных на носители информации (такие, как жесткие диски, флеш-карты и т. п.), цифровая обработка зарегистрированных сигналов (фильтрация, вычисление диагностических показателей, распознавание состояний, принятие решений и т. д.), представление (визуализация) как исходных данных, так и обработанных данных (вычисленных показателей). По такой схеме построены многие системы сбора медицинских данных [4; 5; 6; 7; 8; 9; 10].

В зависимости от целей регистрации сигналов каждому из этапов можно назначить тот или иной приоритет, т. е. выделить главные и второстепенные задачи. Например, при холтеровском мониторинге запись сигнала без искажений на носители информации является более приоритетной задачей, чем визуализация сигналов, а при прикроватном мониторинге в условиях реанимационного отделения – визуализация текущего состояния пациента приоритетна для принятия, допустим, экстренных решений при реанимации человека.

Для построения эффективных вычислительных систем в такой популярной и распространенной операционной системе, как Windows, необходимо учитывать тот факт, что эта система является системой с вытесняющей многозадачностью, т. е. в каждый момент времени у одного и того же процесса может быть разное количество вычислительных ресурсов в зависимости от доли процессорного времени, которое по своим алгоритмам предоставит в этот момент времени операционная система. Это означает, что даже если в операционной системе работает всего одна задача регистрации медицинских сигналов в реальном времени, то и это не гаранти-

рует постоянство представления вычислительных ресурсов, так как часто операционная система Windows представляет вычислительные ресурсы системным процессам, таким как обслуживание оперативной памяти (кеширование, копирование страниц на жесткий диск и т. п.), обработка интерфейсов пользователя (обработка ввода клавиатуры, мыши и т. п.) и т. д. [9].

Материалы и методы

Этапы сбора и обработки данных в программном обеспечении систем обработки многоканальных медицинских сигналов можно условно группировать в такие категории, как источники данных, обработчики данных и визуализация, причем порядок следования этих этапов именно такой: сначала источник данных создает информационные потоки, потом происходит обработка этих потоков, а в конце подключается визуализация необходимых данных [11; 12].

Источники данных создают информационные потоки путем заполнения буферов памяти данными из аппаратной части комплекса системы сбора данных. Скорость заполнения буфера зависит от таких факторов, как частота дискретизации сигнала, количество каналов и, соответственно, время заполнения буфера зависит от скорости заполнения и объема этого буфера. Поэтому источники данных выдают информацию квантами или кадрами (фреймами). Так как процесс формирования этих кадров зависит

в основном от аппаратной части комплекса системы сбора данных, то центральный процессор компьютера с операционной системой Windows практически не используется в этом процессе. Это приводит к тому, что во время формирования очередного кадра данных целесообразно переключить центральный процессор на выполнение других задач обработки и визуализации данных. Такой подход предусматривает использование в вычислительной системе принципов параллелизма и конвейеризации. Как известно, при параллелизме увеличение вычислительной мощности происходит путем совмещения операций за счет обработки в нескольких копиях аппаратной структуры, т. е. происходит одновременная работа всех элементов аппаратных структур, которые выполняют обработку различных частей одного и того же процесса. Например, если для вычислений используется современный многоядерный процессор, то задачу можно решить и на одном ядре, а можно за счет параллелизма распределить вычисления сразу на несколько ядер, что, как правило, приводит к увеличению эффективности вычислений.

При конвейеризации (или конвейерной обработке) происходит дробление общего вычислительного процесса на определенные стадии, называемые ступенями. На каждую ступень выделяется отдельная часть аппаратных средств. Между ступенями организуется процесс передачи входных-выходных данных.

Итак, при разработке сколь угодно сложной системы обработки данных можно выделить несколько этапов (несколько ступеней) обработки данных, причем данные передаются от одной ступени к другой. Увеличение вычислительной мощности происходит вследствие того, что несколько ступеней работают в один и тот же момент времени, выполняя различные вычисления. У конвейеризации есть и недостатки, в частности, необхо-

димо формировать управление передачей данных от одной ступени к другой и тратить на это дополнительные ресурсы.

В разрабатываемом программном обеспечении обработки медицинских сигналов предлагаемая архитектура позволит более эффективно использовать современные многоядерные вычислительные платформы. Структура конвейера разрабатываемой системы приведена ниже (рис. 1).

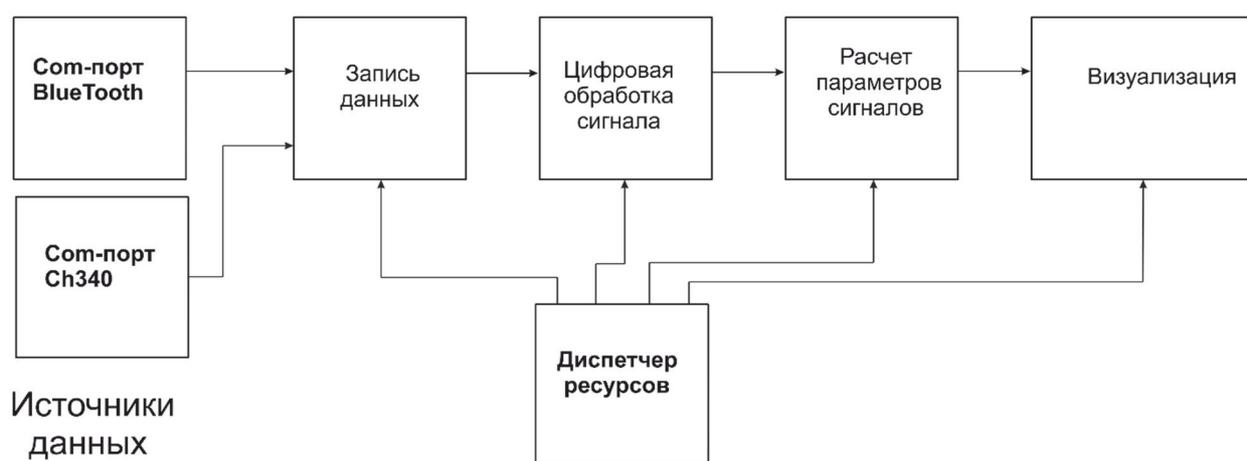


Рис. 1. Конвейерная архитектура системы обработки медицинских сигналов

Fig. 1. Pipeline architecture of a medical signal processing system

На рисунке 1 представлены примеры источников данных – системы, подключенные через драйвер BlueTooth операционной системы Windows. Этот драйвер создает в системе виртуальные com-порты, и процесс ввода-вывода происходит с помощью стандартных файловых функций CreateFile, ReadFile, WriteFile и т. д. Также возможно использовать и другие драйверы, в частности драйвер микросхемы Ch340 – конвертера интерфейсов USB-TTL, которые

встроены во множество систем, к примеру, таких как микроЭВМ Arduino. Драйвер микросхемы Ch340 также создает виртуальные com-порты и процесс ввода-вывода происходит аналогично.

Примеры обработчиков данных на рисунке 1 представлены в виде блоков записи данных на диск или флеш-память компьютера, блока цифровой обработки сигнала, где происходит фильтрация сигнала от помех, блока расчета параметров сигнала, где происходит расчет частоты, амплитуды и т. п. параметров

для диагностики, и блока визуализации как исходных сигналов, так и обработанных сигналов, а также рассчитанных параметров.

Управляет параметрами обработки диспетчер ресурсов, который в зависимости от первоначальных установок пользователя, а также текущих показателей загруженности процессора может динамически изменять параметры обработки сигналов для регулирования вычислительной емкости всей системы.

Так как программный код каждой ступени конвейера должен выполняться одновременно с другими ступенями, то имплементацию подобной функциональности целесообразно возложить на стандартные потоки (Threads) операционной системы Windows. Этому способствуют также многообразие синхронизирующих объектов, представляемых операционной системой Windows, таких как мьютексы, события и семафоры [13; 14]. Передачу данных между ступенями можно осуществлять с помощью буферов памяти каждой ступени с настраиваемыми указателями на эти буферы таким образом, чтобы у каждой ступени был доступ к входным и выходным данным. Естественно, для источников данных входными данными будет информация, получаемая из аппаратной части комплекса, а для модуля визуализации выходом будет экран или пользовательский интерфейс. Процесс чтения данных тогда будет синхронизироваться

мьютексом, который создается в предыдущей ступени и открывается по определенному имени в последующей ступени. С помощью мьютекса решается проблема «писателей и читателей» с использованием общего ресурса – блока памяти с необходимыми данными. Во время формирования нового кадра данных «писатель» захватывает мьютекс с помощью системной функции `WaitForSingleObject`, а по окончании процесса заполнения кадра освобождает мьютекс с помощью функции `ReleaseMutex`. «Читатели» управляют мьютексом также с помощью функций `WaitForSingleObject` и `ReleaseMutex`, однако вызов этих функций идет сразу друг за другом и владение мьютексом у потока «читателя» происходит минимальное время. Мьютекс тогда сигнализирует о том, что «писатель» закончил формировать кадр данных в разделяемой памяти и «читатели» могут прочитать новую порцию данных. В противном случае без использования синхронизации возможны случаи чтения не до конца сформированных кадров с частями устаревшей и уже новой информации, т. е. могут происходить случаи конфликтов доступа к общему ресурсу.

Также в ступенях системы регистрации данных должны быть функции конструкторов, деструкторов и процедуры основного функционала. Конструкторы отвечают за создание ступени, инициализацию переменных, настройку (созда-

ние) синхронизирующих объектов, выделение памяти под буферы, в ступенях визуализации инициализацию графики, в ступенях-источниках данных открытие портов ввода-вывода операционной системы, а также инициализацию и настройку аппаратной части всего комплекса регистрации сигналов. Деструкторы отвечают в основном за освобождение занятой памяти, а также за закрытие портов ввода-вывода операционной системы. Процедуры основного функционала выполняют непосредственную обработку данных для решения общей задачи. Причем процедуры основного

функционала могут иметь параметры, которые управляют качеством или даже полной редукцией функциональности для адаптации ступени к недостаткам вычислительных ресурсов в данный момент времени. Например, возможна адаптивная подстройка частоты дискретизации сигналов, точность обработки или вычисления диагностических показателей, точность отрисовки сигналов в блоке визуализации и т. п.

Таким образом, структура ступени системы регистрации данных показана на рисунке 2.

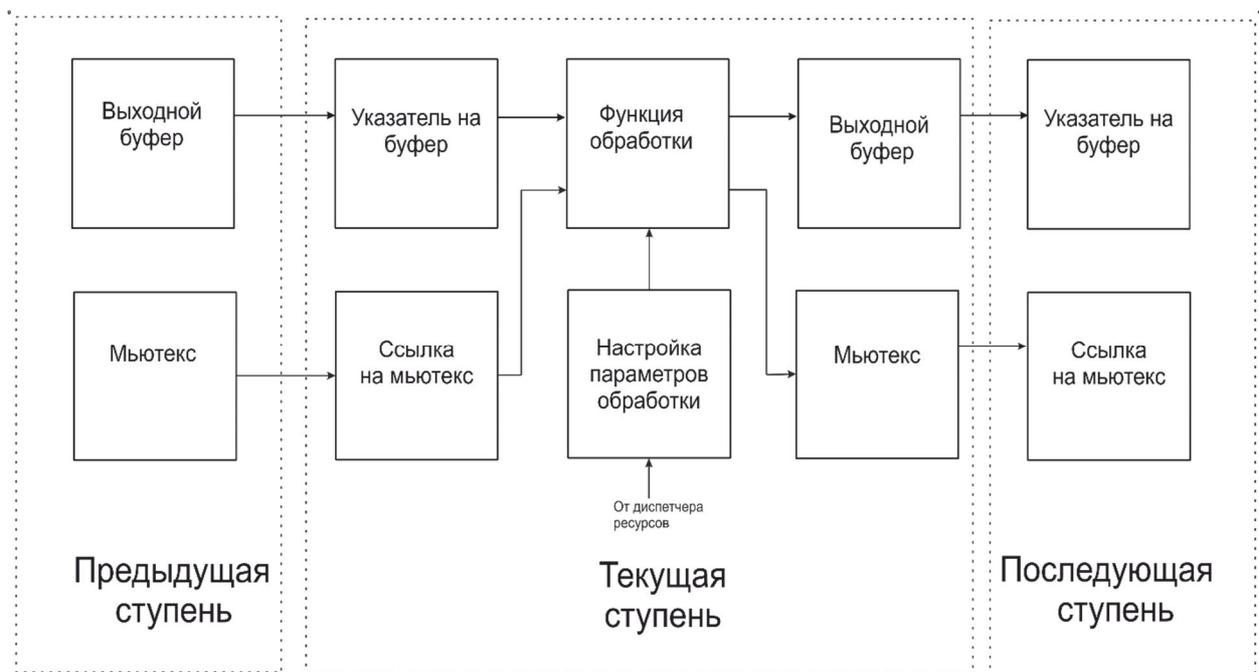


Рис. 2. Структура ступени системы регистрации данных

Fig. 2. The structure of the stage of the data recording system

На рисунке 2 показана взаимосвязь трех ступеней: предыдущей, текущей и последующей. В реальной системе предыдущей ступени может не быть,

например, в источниках данных, а последующей ступени может не быть, например, в блоках визуализации. Текущая ступень имеет указатели на блоке памяти (выходной буфер) предыдущей

ступени и ссылку на мьютекс предыдущей ступени. По команде мьютекса предыдущей ступени текущая ступень получает сигнал об обновлении данных в выходном буфере. С помощью указателя на буфер текущая ступень производит чтение и обработку данных в функции обработки. Функция обработки имеет параметры обработки (например, порядок используемого цифрового фильтра, точность вычисления диагностического показателя и т. д.), которые могут изменяться как при запуске всего конвейера, так и динамически во время работы конвейера для регулирования вычислительной емкости функции обработки. Результаты работы функции обработки размещаются в блоке памяти (выходном буфере), ссылка на который имеется в распоряжении последующей ступени. Готовность кванта данных для последующей обработки (визуализации) синхронизируется с последующей ступенью собственным мьютексом, ссылка на который есть в последующей ступени.

Если временной интервал изменений входных данных больше времени обработки текущей ступенью, то такая система будет обрабатывать информационный поток без потери данных. Однако может случиться такая ситуация, что входные данные будут меняться быстрее, чем требуется времени на их обработку. Для фиксации такого факта необходимо запустить таймер перед

входом в функцию обработки и остановить его после записи обработанной информации в выходной буфер, это дает информацию о затраченном времени обработки. Измеренное время обработки передается диспетчеру ресурсов для принятия решений о настройке параметров обработки. Также эта информация записывается в специальный лог-файл для анализа его разработчиком-конфигуратором системы для принятия решений о включении/выключении отдельных функций, скорости получения входных данных (частоты дискретизации сигналов), а также использования более мощного компьютера для реализации всей системы.

Как показали предварительные исследования, двухканальная система регистрации биомедицинских сигналов с частотой дискретизации сигналов до 600 Гц с передачей сигналов по радиопrotocolу Bluetooth с динамической фильтрацией и расчетом диагностических показателей (интеграл мощности в окне) достаточно эффективно обрабатывалась на компьютере с операционной системой Windows 7 с процессором Intel Core i3-4330 @ 3.5 Гц, с видеоускорителем GeForce GTX 750 Ti.

Как уже отмечалось, основными функциями источников данных являются взаимодействие с аппаратной частью всего комплекса и извлечение и не первичных данных. Затем эти данные попадают на ступени обработки, где из

первичных данных получают фильтрованные данные, диагностические показатели и т. п. [12; 15; 16; 17; 18; 19; 20].

В источнике данных целесообразно предусмотреть коэффициент усиления сигнала для возможности усиления и/или инвертирования сигналов источника. Также источник данных перед началом своей работы может анализировать порции данных, которые к нему поступают, и по их структуре определять тип источника данных для учета этой информации в последующей обработке [9; 11; 21].

Одной из особенностей, которую надо учитывать при проектировании источников данных, является то, что драйвер связи с Bluetooth или АЦП, как правило, передает информацию побайтно. Однако с одним байтом информации практически нельзя сделать никаких вычислений, так как для передачи даже одного отсчета АЦП необходимо передать несколько байт информации, например синхробайт нового отсчета, и два байта 16-битного результата АЦП на каждый канал. Как правило, регистрация данных бывает многоканальной, и поэтому в каждый момент времени для передачи информации аппаратная часть формирует кадры из нескольких байт и только потом порцией передает их через канал связи (например, Bluetooth). Между кадрами формируется пауза, длительность которой зависит от скорости передачи информации и частоты дискретизации сигнала. Соизмеримый размер этой паузы очень важно воспроизводить и в

программном источнике данных, потому что если программный источник данных будет работать слишком медленно, то возможно наступление эффектов переполнения и потери данных, а если программный источник данных будет работать слишком быстро, то тогда считывание данных может привести к неполному считыванию кадра, вплоть до одного байта, и невозможности правильному декодированию кадра.

Как уже отмечалось, процедуры основного функционала ступеней конвейерной архитектуры разрабатываемого комплекса могут иметь параметры, которые управляют качеством или даже полной редукцией функциональности для адаптации ступени к недостаткам вычислительных ресурсов в данный момент времени. Для управления этими параметрами может быть выделен отдельный поток системы, который назовем диспетчером ресурсов.

Диспетчер ресурсов в своем конструкторе должен динамически создавать из ступеней весь конвейер, а затем параллельно следить за общей производительностью системы. Внутри потока диспетчера ресурсов будем анализировать текущую загрузенность системы (загруженность необходимого процессора). Решения системы регулирования производительности будут приниматься согласно следующей системе продукционных правил:

Если свободных вычислительных ресурсов больше порога 1, то включаем полную функциональность конвейера.

Если свободных вычислительных ресурсов менее порога 1, но более порога 2, то уменьшаем возможности блока визуализации и включаем всю функциональность блока записи информации на жесткий диск.

Если свободных ресурсов менее порога 2, то редуцируем функциональность по максимуму – выключаем, насколько это возможно, визуализацию.

Результаты и их обсуждение

В результате работы продукционных правил, приведенных выше, разрабатываемое программное обеспечение для многоканальной системы сбора данных динамически адаптируется к загруженности процессоров, наличию у них вычислительного ресурса с целью надежной и непрерывной регистрации медицинских сигналов.

Обработка данных в ступенях-обработчиках конвейера включает в себя такие типичные операции, как запись данных на жесткий диск или в отдельный буфер памяти, фильтрация сигнала – удаление постоянной составляющей или подавление определенного спектра частот, вычисление диагностических показателей сигнала, анализ полученных показателей, принятие решений и т. п. Класс конвейерной обработки данных позволяет по нажатию кнопки в реальном времени начать сбор данных в специальный буфер памяти с последующей возможностью записи информации на жесткий диск.

Цифровые фильтры являются очень важной частью программного обеспечения обработки медицинских сигналов и широко используются для решения самых разных задач [11; 12; 13; 14; 15; 16]. Области применения цифровых фильтров можно поделить на два класса – разделение сигналов и восстановление сигналов. Разделение сигналов необходимо, когда сигнал загрязнен помехами, шумом или другими сигналами. Восстановление сигнала используется, когда сигнал был каким-либо образом искажен. Например, в приведенном выше случае разделяющие фильтры могли вносить существенные искажения в форму сигнала, и после разделения сигналов исходная форма искомого сигнала может быть восстановлена путем специального восстанавливающего фильтра.

Эти проблемы можно решить с помощью аналоговых или цифровых фильтров. Цифровые фильтры в ряде случаев обеспечивают лучшие параметры качества работы по сравнению с аналоговыми фильтрами. При использовании аналоговых фильтров необходимо учитывать ограничения электронных компонентов, таких как точность и стабильность резисторов и конденсаторов. Эффективность же используемых алгоритмов цифровой фильтрации настолько высока, что производительность цифрового фильтра часто можно игнорировать.

Примеры простых цифровых фильтров, используемых в разрабатываемой

системе обработки медицинских сигналов:

1. Фильтр единичного усиления:

$$y_n = x_n.$$

Каждое выходное значение y_n точно такое же, как соответствующее входное значение x_n :

$$y_0 = x_0,$$

$$y_1 = x_1$$

Это тривиальный случай, когда фильтр не влияет на сигнал и по факту просто передает сигнал на следующую ступень обработки.

2. Простой фильтр усиления:

$$y_n = Kx_n \quad (K = \text{constant}).$$

Этот фильтр просто применяет коэффициент усиления K к каждому входному значению:

$$y_0 = Kx_0,$$

$$y_1 = Kx_1$$

Применяется в разрабатываемой системе для улучшения визуализации, а также для адаптации смены регистрирующих электродов местами друг с другом.

3. Фильтр задержки:

$$y_n = x_{n-1}.$$

Выходное значение в момент времени $t = n_h$ — это просто входное значение в момент времени $t = (n-1)h$, т. е. сигнал задерживается на время h :

$$y_0 = x_{-1},$$

$$y_1 = x_0$$

Поскольку предполагается, что выборка начинается при $t = 0$, входное значение x_{-1} при $t = -h$ не определено. Обычно это (и любые другие значения x до $t = 0$) принимают за ноль.

Применяются в разрабатываемой системе для компенсации задержки регистрации канала вследствие работы драйвера или особенностей передачи канала из-за аппаратных особенностей.

4. Двусторонний разностный фильтр:

$$y_n = x_n - x_{n-1}.$$

Выходное значение при $t = nh$ равно разнице между текущим входом x_n и предыдущим входом x_{n-1} :

$$y_0 = x_0 - x_{-1},$$

$$y_1 = x_1 - x_0,$$

$$y_2 = x_2 - x_1,$$

т. е. выход представляет собой изменение входных данных за самый последний интервал выборки h . Действие этого фильтра аналогично действию аналоговой схемы дифференциатора. Необходимо для регистрации дифференциальных сигналов, таких как дифференциальная реограмма, или, например, для обнаружения R-зубца на электрокардиограмме.

5. Двусторонний средний фильтр:

$$y_n = (x_n + x_{n-1})/2.$$

Выход представляет собой среднее (среднее арифметическое) текущего и предыдущего ввода:

$$y_0 = (x_0 + x_{-1})/2,$$

$$y_1 = (x_1 + x_0)/2,$$

$$y_2 = (x_2 + x_1)/2.$$

Это простой тип фильтра нижних частот, поскольку он сглаживает высокочастотные колебания сигнала. В нашей системе применяется для автоматической компенсации постоянной составляющей сигнала. Основным досто-

инством этого фильтра является необходимость малых вычислительных емкостей для реализации: необходима одна операция сложения и одна операция деления на два, в целочисленном варианте которую можно заменить операцией сдвига вправо.

6. Трехчленный фильтр среднего:

$$y_n = (x_n + x_{n-1} + x_{n-2}) / 3.$$

Это похоже на предыдущий пример, где берется среднее значение текущего и двух предыдущих входов:

$$y_0 = (x_0 + x_{-1} + x_{-2}) / 3,$$

$$y_1 = (x_1 + x_0 + x_{-1}) / 3,$$

$$y_2 = (x_2 + x_1 + x_0) / 3.$$

Как и прежде, x_{-1} и x_{-2} принимаются равными нулю. Трехчленный фильтр среднего лучше сглаживает сигнал по сравнению с двусторонним средним фильтром, однако для его реализации требуется существенно больше вычислительных емкостей.

7. Центральнo-разностный фильтр:

$$y_n = (x_n - x_{n-2}) / 2.$$

По своему эффекту и применению он аналогичен двустороннему разностному фильтру. Выход равен половине изменения входного сигнала за предыдущие два интервала дискретизации:

$$y_0 = (x_0 - x_{-2}) / 2,$$

$$y_1 = (x_1 - x_{-1}) / 2,$$

$$y_2 = (x_2 - x_0) / 2.$$

Выход цифрового фильтра $y(k)$ зависит от текущего входа и от нескольких входов перед $x(k, k-1, k-2, \dots, k-n)$, поэтому цифровой фильтр должен иметь память для хранения значений входов в прошлый момент времени. Например:

$$y(k) = x(k) + x(k - 1).$$

Это фильтр, выход фильтра равен $y(k)$, который определяется как сумма входного сигнала $x(k)$ и сигнала в предыдущий момент времени $x(k-1)$.

Итак, суммируя проведенные исследования, была разработана модульная структура программного обеспечения обработки медицинских сигналов в ОС Windows для многоканальной системы сбора данных (рис. 3).

Программное обеспечение построено по конвейерному принципу, каждая ступень конвейера является потомком от потока Windows и выполняется параллельно. Поток Windows имплементируется в модуле «Поток Windows TThread». Этот модуль является базовым (родителем) для модуля «Базовый класс ступени».

Модуль «Базовый класс ступени» построен на основе абстрактного класса с набором чистых виртуальных функций, которые реализуются в последующих потомках для целей полиморфизма программы. Модуль «Базовый класс ступени» служит родителем для других абстрактных классов, описанных в модулях «Источник данных» и «Обработчик данных».

Неабстрактные модули программы можно разделить на четыре группы: источники данных, которые являются потомками базового класса «Источник данных», обработчики данных, которые являются потомками базового класса «Обработчик данных», вспомогательные модули и системные модули.

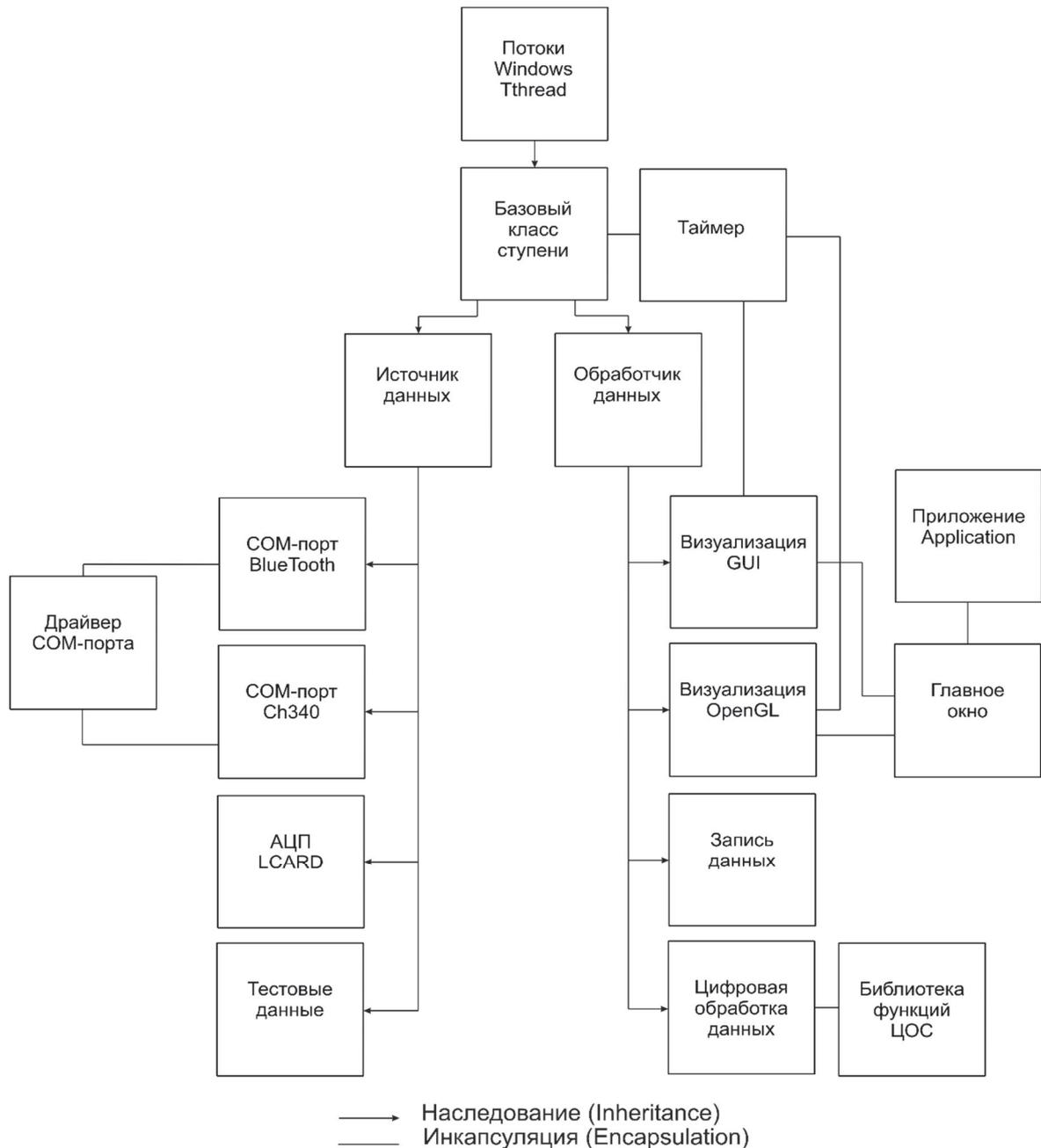


Рис. 3. Модульная структура программного обеспечения обработки медицинских сигналов в ОС Windows для многоканальной системы сбора данных

Fig. 3. Modular structure of the medical signal processing software in Windows OS for a multichannel data acquisition system

Источники данных являются потомками базового класса «Источники данных» и являются поставщиками информации для всей системы. Разработаны следующие источники данных:

– тестовые данные. Этот источник выдает тестовые периодические сигналы с настраиваемой амплитудой и частотой. Эти сигналы необходимы для настройки и тестирования всей системы;

– АЦП L-CARD. Этот модуль подключает аппаратный источник данных на основе промышленного АЦП фирмы L-CARD, выполненного в виде PCI-платы. При этом используются драйвера фирмы L-CARD для получения данных из платы на шине PCI [21];

– Com-порт BlueTooth. Этот модуль необходим для получения информации по беспроводным линиям связи с протоколом BlueTooth с использованием стандартного драйвера Windows. Так как стандартный драйвер BlueTooth организует виртуальные Com-порты для связи, то операции ввода-вывода из устройств сводятся к операциям ввода-вывода из com-портов Windows. Для облегчения работы с Com-портами используется вспомогательный модуль «Драйвер СОМ-порта». Рассматриваемый источник данных используется для подключения к системе широкого спектра устройств непрерывного мониторинга биомедицинских сигналов: пульсоксиметров, холтеровских мониторов, регистраторов ЭМГ и т. п.;

– Com-порт Ch340. Этот модуль использует драйвер микросхемы Ch340 для получения информации. Этот драйвер аналогично драйверу BlueTooth формирует виртуальные Com-порты для ввода-вывода информации. Микросхема Ch340 используется для подключения микроЭВМ типа Arduino к порту USB компьютера. МикроЭВМ Arduino, в свою очередь, может организовать множество цифровых протоколов, таких как

SPI, I2C, OneWire, Parallel Slave, USART, АЦП и т. д., для подключения широкого спектра датчиков и других цифровых систем. Так же, как и предыдущий модуль, этот модуль для облегчения работы с Com-портами использует вспомогательный модуль «Драйвер СОМ-порта».

Обработчики данных являются потоками базового класса «Обработчики данных» и производят обработку информации, которую выдают источники данных. Разработаны следующие обработчики данных:

– цифровая обработка данных. Этот модуль производит обработку данных, такую как фильтрация, вычисление диагностических показателей и т. п. в реальном времени. Для своей работы используется вспомогательный модуль-библиотека «Библиотека функций ЦОС», где собраны основные процедуры цифровой обработки сигналов;

– запись данных – производит запись данных на жесткий диск или флеш-память компьютера для документирования регистрируемой информации;

– визуализация GUI – производит отрисовку регистрируемой информации и вычисляемых показателей с использованием графики GUI Windows. Это не самый оптимальный способ визуализации, но он может работать на устройствах без графического ускорителя, которые не поддерживают такие библиотеки, как OpenGL. Для вывода информации на экран используется холст

(canvas) главного окна приложения, модуль которого опишем ниже. Для стабилизации и синхронизации работы модуля используется вспомогательный модуль «Таймер»;

– Визуализация OpenGL – также производит отрисовку регистрируемой информации и вычисляемых показателей с использованием графики библиотеки OpenGL. Применяется на компьютерах с графическим ускорителем, который может поддерживать библиотеку OpenGL. Эффективность вывода графики этим модулем по сравнению с выводом GUI увеличивается в десятки раз. Вывод информации происходит в главном окне приложения, создаваемом модулем «Главное окно». Также для стабилизации и синхронизации работы модуля используется вспомогательный модуль «Таймер».

Системные модули представлены модулями «Главное окно» и «Приложение Application». Модуль «Главное окно» содержит окно Windows для вывода информации, а также панели и меню с управляющими элементами пользовательского интерфейса (UI). Пользовательский интерфейс позволяет управлять программой, задавать параметры работы всей системы и т. п. Для обеспечения этих функций модуль «Главное окно» содержит обработчики событий пользовательского ввода. Пример интерфейсного окна пользователя программного обеспечения с многопоточной архитектурой для регистрации 2-канальной ЭМГ приведен ниже (рис. 4).

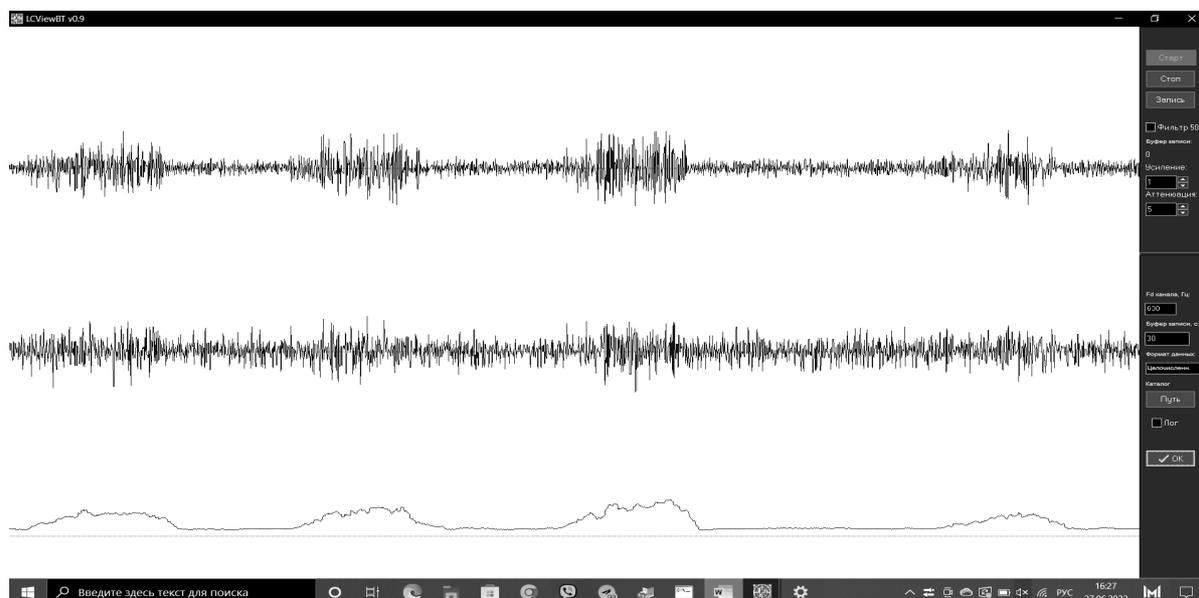


Рис. 4. Пример интерфейсного окна пользователя программного обеспечения с многопоточной архитектурой для регистрации 2-канальной ЭМГ

Fig. 4. An example of a user interface window for software with a multi-threaded architecture for recording 2-channel EMG

Системный модуль «Приложение Application» отвечает за запуск всего приложения, формирование главного окна в операционной системе Windows.

Выводы

Разработан метод, позволяющий вести обработку и графическое отображение многоканальных медицинских сигналов в квазиреальном времени. Метод предполагает осуществление сегментирования программы на легко используемые, дополняемые и изменяемые модули-классы, которые объединены в общую иерархию с использованием объектно ориентированных принципов наследования, что позволяет строить системы регистрации медицинских сигналов любой сложности в операционной системе Windows. Метод основан на дроблении общего вычислительного процесса на определенные стадии, называемые ступенями. На каждую ступень выделяется отдельная часть аппаратных средств, а между ступенями организуется процесс передачи входных-выходных данных. Предложенный метод при передаче данных между ступенями предполагает использование буферов памяти каждой ступени с настраиваемыми указателями на эти буферы таким образом, чтобы у каждой ступени был доступ к входным и выходным данным. Процесс чтения данных синхронизируется мьютексом, который создается в предыдущей ступени и открывается по

определенному имени в последующей ступени.

Предложенная архитектура системы обработки медицинских сигналов позволяет осуществлять конвейерную многопоточную обработку многоканальных медицинских сигналов, что повышает эффективность использования многоядерных вычислительных платформ.

На основе предложенного метода разработана модульная структура программного обеспечения обработки медицинских сигналов в ОС Windows для многоканальной системы сбора данных. Обработка данных в ступенях-обработчиках конвейера включает в себя такие типичные операции, как запись данных на жесткий диск или в отдельный буфер памяти, фильтрация сигнала – удаление постоянной составляющей или подавление определенного спектра частот, вычисление диагностических показателей сигнала, анализ полученных показателей, принятие решений и т. п. Класс конвейерной обработки данных позволяет по нажатию кнопки в реальном времени начать сбор данных в специальный буфер памяти с последующей возможностью записи информации на жесткий диск. Согласно предложенной модульной структуре разработано программное обеспечение обработки многоканальных медицинских сигналов в операционной системе Windows в реальном времени.

Список литературы

1. Томакова Р. А., Филист С. А., Дураков И. В. Программное обеспечение автоматической классификации рентгенограмм грудной клетки на основе гибридных классификаторов // Экология человека. 2018. № 6. С. 59-64.
2. Филист С. А., Томакова Р. А., Яа З.Д. Универсальные сетевые модели для задач классификации биомедицинских данных // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4(43), ч. 2. С. 44–50.
3. Виртуальные потоки в гибридных решающих модулях классификации сложно-структурируемых данных / А. В. Киселев, Д. Ю. Савинов, С. А. Филист, О. В. Шаталова, В. В. Жилин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2018. № 2 (42). С. 137-149.
4. Биотехническая система с виртуальной реальностью в реабилитационных комплексах с искусственными обратными связями / А. А. Трифонов, Е. В. Петрунина, С. А. Филист, А. А. Кузьмин, В. В. Жилин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 4. С. 46-66.
5. Biotechnical system for control to the exoskeleton limb based on surface myosignals for rehabilitation complexes / A. A. Trifonov, A. A. Kuzmin, S. A. Filist, S. V. Degtyarev, E. V. Petrunina // 14th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT 2020 - Proceedings 14, 2020. P. 9368588.
6. 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. Т. 12, № 1. С. 8-32.
7. Biotechnical system based on fuzzy logic prediction for surgical risk classification using analysis of current-voltage characteristics of acupuncture points / S. A. Filist, R. T. Al-Kasasbeh, O. V. Shatalova, N. A. Korenevskiy, A. S. Ashraf, Z. U. Protasova, M. Pyash, M. Lukashov // Journal of Integrative Medicine. 2022. № 20. P. 252–264.
8. Предикторы синхронности системных ритмов живых систем для классификаторов их функциональных состояний / Т. В. Петрова, С. А. Филист, С. В. Дегтярев, А. В. Киселев, О. В. Шаталова // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2018. Т. 17, № 3. С. 693–700.
9. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2015616286. Программа сингулярного анализа электрокардиосигнала / Р. А. Томакова, Яа Зар До, О. В. Шаталова, М. В. Томаков. № 2015612066; заявл. 23.03.15; опубл. 05.06.15.

10. Томакова Р. А., Мухаммед А. А., Плесканос Л. В. Многоагентные системы классификации на основе нелинейных моделей импеданса в биоактивных точках // Биомедицинская радиоэлектроника. 2014. № 9. С. 51-55.

11. Пат. на изобретение Российская Федерация 2504328 С1. Устройство для контроля анизотропии электрической проводимости биотканей / Томакова Р. А., Филист С. А., Кузьмин А. А., Кузьмина М. Н. [и др.]. № 2012128471/14; заявл. 06.07.12; опубл. 20.01.14 .

12. Tomakova R., Filist S., Pykhtin A. Development and research of methods and algorithms for intelligent systems for complex structured images classification // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12, N 22. P. 6039-6041.

13. Рихтер Дж. Windows для профессионалов: создание эффективных Win32 приложений с учетом специфики 64-разрядной версии Windows. СПб.: Питер; М.: Русская Редакция, 2001. 752 с.

14. Техническая документация Майкрософт. URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/> (дата обращения: 01.03.2022).

15. Формирование дескрипторов для классификаторов функционального состояния системы дыхания на основе спектрального анализа электрокардиосигнала / М. Б. Мяснянкин, С. А. Филист, А. В. Киселев, А. А. Кузьмин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 3/4. С. 8-28.

16. Classification of the functional state of the respiratory system based on the spectral analysis of the electrocardio signal / М. В. Myasnyankin, А. А. Kuzmin, S. А. Filist, L. V. Shulga // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems", 2021.

17. Neural network classifiers with descriptors obtained on the basis of analysis of the system rhythms in intellectual prediction systems for non-hospital pneumonia / М. В. Myasnyankin, А. А. Kuzmin, S. А. Filist // Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference Artificial Intelligence and Digital Technologies in Technical Systems, 2021. P. 012046.

18. Формирование признакового пространства для задач классификации сложноструктурируемых изображений на основе спектральных окон и нейросетевых структур / 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.

19. Developing neural network model for predicting cardiac and cardiovascular health using bioelectrical signal processing / S. А. Filist, R. T. Al-Kasasbeh, O. V. Shatalova, A. Aikeyeva, N. A. Korenevskiy, A. Shaqadand, A. Trifonov, M. Ilyash // Computer Methods

in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2022. Vol. 25, is. 8. <https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1986486>.

20. Белобров А. П., Кузьмин А. А., Филист С. А. Многомерная частотная селекция в задачах анализа медленных волн // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. № 2. С. 4–10.

21. Кузьмин А. А., Белозеров А. Е., Пронин Т. В. Регистрация и обработка медицинских сигналов в операционной системе Windows в реальном времени с использованием аналоговых интерфейсов L-CARD // Медицинская техника. 2008. № 2. С. 4-7.

References

1. Tomakova R. A., Filist S. A., Fools I. V. Programmnoe obespechenie avtomaticheskoi klassifikatsii rentgenogramm grudnoi kletki na osnove gibridnykh klassifikatorov [Software for automatic classification of chest radiographs based on hybrid classifiers]. *Ekologiya cheloveka = Human Ecology*, 2018, no. 6, pp. 59-64.

2. Filist S. A., Tomakova R. A., Yaa Z. D. Universal'nye setevye modeli dlya zadach klassifikatsii biomeditsinskikh dannykh [Universal network models for the problems of biomedical data classification]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4(43), pt. 2, pp. 44–50.

3. Kiselev A. V., Savinov D. Yu., Filist S. A., Shatalova O. V., Zhilin V. V. Virtual'nye potoki v gibridnykh reshayushchikh modulyakh klassifikatsii slozhnostrukturiruemyykh dannykh [Virtual flows in hybrid decision modules for classifying complex data]. *Prikladnyy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2018, no. 2 (42), pp. 137-149.

4. Trifonov A. A., Petrunina E. V., Philist S. A., Kuzmin A. A., Zhilin V. V. Biotekhnicheskaya sistema s virtual'noi real'nost'yu v reabilitatsionnykh kompleksakh s iskusstvennymi obratnymi svyazyami [Biotechnical system with virtual reality in rehabilitation complexes with artificial feedback]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroyeniye = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Technology, Informatics. Medical Instrumentation*, 2019, vol. 9, no. 4, pp. 46-66.

5. Trifonov A. A., Kuzmin A. A., Filist S. A., Degtyarev S. V., Petrunina E. V. Biotechnical system for control to the exoskeleton limb based on surface myosignals for rehabilitation complexes. 14th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT 2020 – Proceedings 14, 2020, p. 9368588.

6. Kiselev A. V., Kuzmin A. A., Myasnyankin M. B., Maslak A. A., Philist 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 waves in the VLF range]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroyeniye = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Technology, Informatics. Medical instrumentation*, 2022, no. 1, vol. 12, pp. 8-32.

7. Filist S. A., Al-Kasasbeh R. T., Shatalova O. V., Korenevskiy N. A., Ashraf A. S., Protasova Z. U., Ilyash M., Lukashov M. Biotechnical system based on fuzzy logic prediction for surgical risk classification using analysis of current-voltage characteristics of acupuncture points. *Journal of Integrative Medicine*, 2022, no. 20, pp. 252–264.

8. Petrova T. V., Filist S. A., Degtyarev S. V., Kiselev A. V., Shatalova O. V. Prediktory sinkhronnosti sistemnykh ritmov zhivykh sistem dlya klassifikatorov ikh funktsional'nykh sostoyaniy [Synchronicity predictors of systemic rhythms of living systems for classifiers of their functional states]. *Sistemnyy analiz i upravleniye v biomeditsinskikh sistemakh = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2018, vol. 17, no. 3, pp. 693–700.

9. Tomakova R. A., Yaa Zar Do, Shatalova O. V., Tomakov M. V. Programma singular'nogo analiza elektrokardiosignala [Program of singular electrocardiosignal analysis]. Certificate RF, no. 2015616286, 2015.

10. Tomakova R. A., Mohammed A. A., Pleskanos L. V. Mnogoagentnye sistemy klassifikatsii na osnove nelineinykh modelei impedansa v bioaktivnykh tochках [Multiagent classification systems based on nonlinear impedance models in bioactive points]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2014, no. 9, pp. 51-55.

11. Tomakova R. A., Filist S. A., Kuzmin A. A., Kuzmina M. N., eds. Ustroistvo dlya kontrolya anizotropii elektricheskoi provodimosti biotkanei [A device for controlling the anisotropy of electrical conductivity of biological tissues]. Patent RF, no. 2504328 C1, 2014.

12. Tomakova R. A., Filist S., Pykhtin A. Development and research of methods and algorithms for intelligent systems for complex structured images classification. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12. no. 22. pp. 6039-6041.

13. Richter J. Windows dlya professionalov: sozдание effektivnykh Win32 prilozhenii s uchetom spetsifiki 64-razryadnoi versii Windows [Windows for Professionals: Building Efficient Win32 Applications with 64-bit Windows in Mind]. St. Petersburg, Peter Publ., Moscow, Russian Edition Publ., 2001. 752 p.

14. Tekhnicheskaya dokumentatsiya Maikrosoft [Microsoft technical documentation]. Available at: <https://docs.microsoft.com/ru-ru>. (accessed 01.03.2022)

15. Myasnyankin M. B., Philist S. A., Kiselev A. V., Kuzmin A. A. Formirovaniye deskriptorov dlya klassifikatorov funktsional'nogo sostoyaniya sistemy dykhaniya na osnove spektral'nogo analiza elektrokardiosignala [Formation of descriptors for classifiers of the functional state of the respiratory system based on the spectral analysis of the electrocardiosignal]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroyeniye = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Technology, Informatics. Medical Instrumentation*, 2020, vol. 10, no. 3/4, pp. 8-28.

16. Myasnyankin M. B., Kuzmin A. A., Filist S. A., Shulga L. V. Classification of the functional state of the respiratory system based on the spectral analysis of the electrocardio signal. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems", 2021.

17. Myasnyankin M. B., Kuzmin A. A., Filist S. A. Neural network classifiers with descriptors obtained on the basis of analysis of the system rhythms in intellectual prediction systems for non-hospital pneumonia. Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference Artificial Intelligence and Digital Technologies in Technical Systems, 2021, p. 012046.

18. Filist S. A., Ali Kassim K. D., Kuzmin A. A., Shatalova O. V., Alyabyev E. A. Formirovaniye priznakovogo prostranstva dlya zadach klassifikatsii slozhnostrukturiruyemykh izobrazheniy na osnove spektral'nykh okon i neyrosetevykh struktur [Formation of a feature space for problems of classifying complexly 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.

19. Filist S., Al-Kasasbeh R. T., Shatalova O. V., Aikeyeva A., Korenevskiy N. A., Shaqadand A., Trifonov A., Ilyash M. Developing neural network model for predicting cardiac and cardiovascular health using bioelectrical signal processing. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2022, vol. 25, is. 8. <https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1986486>

20. Belobrov A. P., Kuzmin A. A., Philist S. A. Mnogomernaya chastotnaya selektsiya v zadachakh analiza medlennykh voln [Multidimensional frequency selection in problems of analysis of slow waves]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2010, no. 2, pp. 4–10.

21. Kuzmin A. A., Belozarov A. E., Pronin T. V. Registratsiya i obrabotka meditsinskikh signalov v operatsionnoy sisteme Windows v real'nom vremeni s ispol'zovaniyem analogovykh interfeysov L-CARD [Registration and processing of medical signals in the Windows operating system in real time using analog interfaces L-CARD]. *Meditsinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2008, no. 2, pp. 4-7.

Информация об авторах / Information about the Authors

Мяснянкин Максим Борисович, аспирант
кафедры биомедицинской инженерии,
Юго-Западного государственного университета,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: 79606039503@mail.ru

Maksim B. Myasnyankin, Post-Graduate
Student of the Department of Biomedical
Engineering, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: 79606039503@mail.ru

Кузьмин Александр Алексеевич, доктор
технических наук, доцент, доцент кафедры
биомедицинской инженерии, Юго-Западный
государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: ku3bmin@gmail.com

Alexander A. Kuzmin, Dr. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Associate Professor
of the Department of Biomedical Engineering,
Southwest State University, Kursk,
Russian Federation,
e-mail: ku3bmin@gmail.com

Вадим Владимирович Серебровский, доктор
технических наук, профессор, Юго-Западный
государственный университет, г. Курск,
Российская Федерация,
e-mail: SFilist@gmail.com

Vadim V. Serebrovsky, Dr. of Sci. (Enginee-
ring), Professor, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: SFilist@gmail.com

Алдохин Евгений Александрович, студент,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: ndanon@outlook.com

Evgeny A. Aldokhin, Student, Southwest State
University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: ndanon@outlook.com

Оценка фракционной сатурации крови у пилота воздушного судна в условиях влияния динамических полётных факторов

Д. С. Коптев¹ ✉, И. С. Юдин¹

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

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Резюме

Целью исследования является повышение точности при оценке уровня насыщения крови кислородом у пилота воздушного судна при проведении неинвазивных спектрофотометрических измерений в проходящем свете в условиях влияния динамических факторов полёта.

Методы исследования основаны на базовых понятиях взаимодействия оптического излучения с биологической тканью и кровью, теории пульсовой оксиметрии, теории вероятностей, математической статистике, теории сигналов. При разработке математических моделей фотоплетизмографических сигналов, авиационных шумов, вибрации, а также для их представления в частотной области в качестве инструментария использовалась программа MATLAB 2019b с графическим интерфейсом пользователя со встроенным пакетом математических функций Symbolic Math Toolbox.

Результаты. Разработаны математические модели, позволяющие оценить уровень функциональной и фракционной сатурации крови. Проведены модельные исследования влияния динамических полётных факторов, таких как широкополосная квазигармоническая вибрация и авиационный шум на точность оценки уровня сатурации крови пилота. Показано, что для оценки функциональной сатурации достаточно использование двух источников оптического излучения, тогда как для фракционной их минимальное количество должно быть равно четырём и определяется по количеству учитываемых фракций гемоглобина в составе крови. Применение четырёх источников оптического излучения заданного спектрального состава (660 нм, 805 нм, 880 нм и 940 нм) при проведении неинвазивных спектрофотометрических измерений для оценки уровня насыщения крови кислородом по сравнению с двумя источниками (660 нм и 940 нм) позволяет снизить абсолютную погрешность: в условиях влияния широкополосной квазигармонической вибрации – в 3,64 раза; в условиях влияния авиационного шума (70 дБ) и (30 дБ) – в 7,64 и 2,5 раза соответственно; в условиях влияния комплексного воздействия вибрации и авиационного шума (30 дБ) – в 2,22 раза.

© Коптев Д. С., Юдин И. С., 2022

Заключение. Для адекватной оценки функционального состояния пилота по значениям его физиологических показателей, в частности по уровню насыщения крови кислородом, необходимо использование средств диагностики на базе многоволновой пульсовой оксиметрии, позволяющих оценивать уровень фракционной сатурации.

Ключевые слова: пульсовая оксиметрия; функциональная сатурация; фракционная сатурация; фотоплетизмографический сигнал; спектрофотометрические измерения; точность; абсолютная погрешность.

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

Для цитирования: Коптев Д. С., Юдин И. С. Оценка фракционной сатурации крови у пилота воздушного судна в условиях влияния динамических полётных факторов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 2. С. 98–120. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-98-120>.

Поступила в редакцию 11.04.2022

Подписана в печать 05.05.2022

Опубликована 27.03.2022

Evaluation of Fractional Blood Saturation in an Aircraft Pilot Under the Influence of Dynamic Flight Factors

Dmitry S. Koptev¹ ✉, Ilya S. Yudin¹

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

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Abstract

The purpose of research is to improve the accuracy in assessing the level of blood oxygen saturation in an aircraft pilot when conducting non-invasive spectrophotometric measurements in transmitted light under the influence of dynamic flight factors.

Methods are based on the basic concepts of the interaction of optical radiation with biological tissue and blood, the theory of pulse oximetry, probability theory, mathematical statistics, signal theory. When developing mathematical models of photoplethysmographic signals, aircraft noise, vibration, as well as for their representation in the frequency domain, the MATLAB 2019b program with a graphical user interface with a built-in Symbolic Math Toolbox package of mathematical functions was used as a tool.

Results. Mathematical models have been developed to assess the level of functional and fractional blood saturation. Model studies of the influence of dynamic flight factors, such as broadband quasi-harmonic vibration and aircraft noise, on the accuracy of estimating the pilot's blood saturation level have been carried out. It has been shown that to assess functional saturation, it is sufficient to use two sources of optical radiation, while for fractional saturation, their minimum number should be equal to four and is determined by the number of hemoglobin fractions taken into account in the blood. The use of four sources of optical radiation of a given spectral composition (660 nm, 805 nm, 880 nm and 940 nm) when performing non-invasive spectrophotometric measurements to assess the level of blood oxygen saturation compared to two sources (660 nm and 940 nm) allows to reduce the absolute error: in under the influence of broadband quasi-harmonic vibration - 3.64 times; under the influence of aircraft noise (70 dB) and (30 dB) - by 7.64 and 2.5 times, respectively; under the influence of the combined effects of vibration and aircraft noise (30 dB) - by 2.22 times.

Conclusion. For an adequate assessment of the pilot's functional state according to the values of his physiological parameters, in particular, the level of blood oxygen saturation, it is necessary to use diagnostic tools based on multiwave pulse oximetry, which allow estimating the level of fractional saturation.

Keywords: pulse oximetry; functional saturation; fractional saturation; photoplethysmographic signal; spectrophotometric measurements, accuracy, absolute error.

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

For citation: Koptev D. S., Yudin I. S. Evaluation of Fractional Blood Saturation in an Aircraft Pilot Under the Influence of Dynamic Flight Factors. *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.* 2022; 12(2): 98–120. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-98-120>.

Received 11.04.2022

Accepted 05.05.2022

Published 27.03.2022

Введение

В процессе развития технического оснащения летательных аппаратов, расширения потенциальных возможностей гражданского применения самолетов и

вертолетов возрастает степень сложности решаемых летчиком задач и, соответственно, увеличиваются требования к надежности их деятельности, характеризуемой, в первую очередь, воздействием комплекса различных дестабилизирующих факторов (рис. 1).



Рис. 1. Классификация дестабилизирующих факторов, возникающих во время авиационного полёта [1; 2; 3]

Fig. 1. Classification of destabilizing factors that occur during an aviation flight [1; 2; 3]

Результат влияния отмеченных факторов на функциональное состояние пилота может колебаться от снижения его работоспособности, бдительности и внимательности, вплоть до возникновения профессиональных заболеваний [4; 5]. На сегодняшний день одной из актуальных задач авиационной медицины является организация оперативной непрерывной диагностики функционального состояния пилота непосредственно в процессе полета [6]. Следует отметить, что наиболее важным диагностическим и прогностическим показателем функционального состояния в авиационной медицине является уровень сатурации крови [7]. В рамках данной статьи ограничимся лишь рассмотрением некоторых факторов, обусловленных динамикой полёта, а именно вибрации и авиационного шума различного уровня.

Целью статьи является повышение точности при оценке уровня насыщения крови кислородом у пилота воздушного судна при проведении неинвазивных спектрофотометрических измерений в проходящем свете в условиях влияния динамических факторов полёта.

Материалы и методы

На сегодняшний день большинство методик оценки уровня насыщения крови кислородом являются нечувствительными к присутствию в составе крови дисфункциональных фракций, не

участвующих в кислородном обеспечении организма (метгемоглобин и карбоксигемоглобин). Результатом их использования является определение функциональной сатурации крови [8]:

$$SpO_{2\text{ фун}} = \frac{C_{HbO_2}}{C_{HbO_2} + C_{Hb}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где C_{HbO_2} – молярная концентрация оксигемоглобина;

C_{Hb} – молярная концентрация дезоксигемоглобина.

Основываясь на работах [8; 9; 10], можно сказать, что меньшей погрешностью обладают методики, определяемые фракционную сатурацию крови:

$$SpO_{2\text{ фр}} = \frac{C_{HbO_2}}{C_{HbO_2} + C_{Hb} + C_{HbCO} + C_{metHb}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где C_{HbCO} – молярная концентрация карбоксигемоглобина;

C_{metHb} – молярная концентрация метгемоглобина.

Практически повсеместное использование методики (1) обусловлено тем, что при нормальном функциональном состоянии дополнительные фракции содержатся в крови в достаточно низких концентрациях: metHb – 0,2...0,6%, HbCO – 0...0,8% [11]. Однако при существенном увеличении концентраций метгемоглобина и карбоксигемоглобина, например при курении или изменении функционального состояния под

влиянием дестабилизирующих факторов, результаты оценки функциональной и фракционной сатурации в значительной степени отличаются [8; 11; 12].

Для достижения поставленной цели статьи на первом этапе необходимо разработать математические модели оценки уровня насыщения крови кислородом по амплитуде пульсовой волны.

Оценка уровня насыщения крови кислородом базируется на методах спектрофотометрии, в основе которой лежит закон Бугера – Ламберта – Бера [12; 13; 14]:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{-\varepsilon_i(\lambda) \cdot C_i \cdot d}, \quad (3)$$

где $I(\lambda)$ и $I_0(\lambda)$ – интенсивность прошедшего и падающего света;

$\varepsilon_i(\lambda)$ – коэффициент молярной экстинкции i -го поглощающего вещества;

C_i – молярная концентрация i -го поглощающего вещества;

d – толщина биологической ткани, через которую проходит излучение.

Применение закона Бугера – Ламберта – Бера позволяет установить интенсивность прошедшего света как в случае одного поглощающего вещества, так и для нескольких веществ, не вступающих в химическую реакцию друг с другом, а также постоянной оптической длины пути (рис. 2).

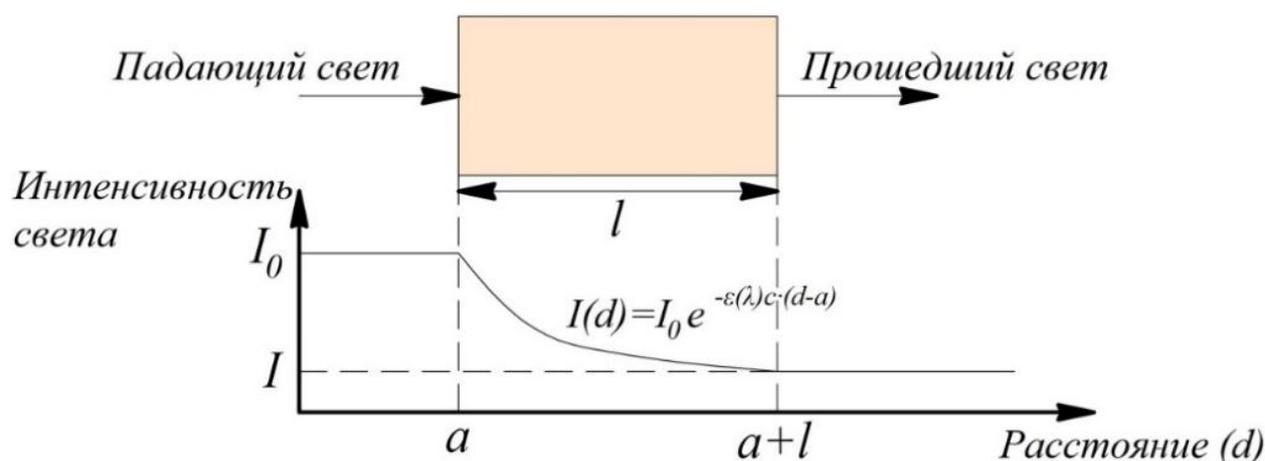


Рис. 2. Изменение интенсивности света в зависимости от расстояния в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера

Fig. 2. Change in light intensity depending on distance in accordance with the Bouguer-Lambert-Beer law

С учётом свойств натурального логарифма $\ln(e^x) = x$ и $\ln\left(\frac{1}{x}\right) = -\ln(x)$ выражение (3) можно записать в виде

$$\ln(I_0(\lambda) / I(\lambda)) = \varepsilon_i(\lambda) \cdot C_i \cdot d. \quad (4)$$

Толщину биологической ткани, содержащей пульсирующий сосуд, можно представить в виде

$$d = d_k + d_k(t) + d_t, \quad (5)$$

где d_k – диаметр пульсирующего сосуда;

$d_k(t)$ – функция изменения диаметра пульсирующего сосуда во времени;

d_t – толщина неппульсирующих компонентов биологической ткани.

На рисунке 3 показано формирование фотоплетизмографического сигнала.

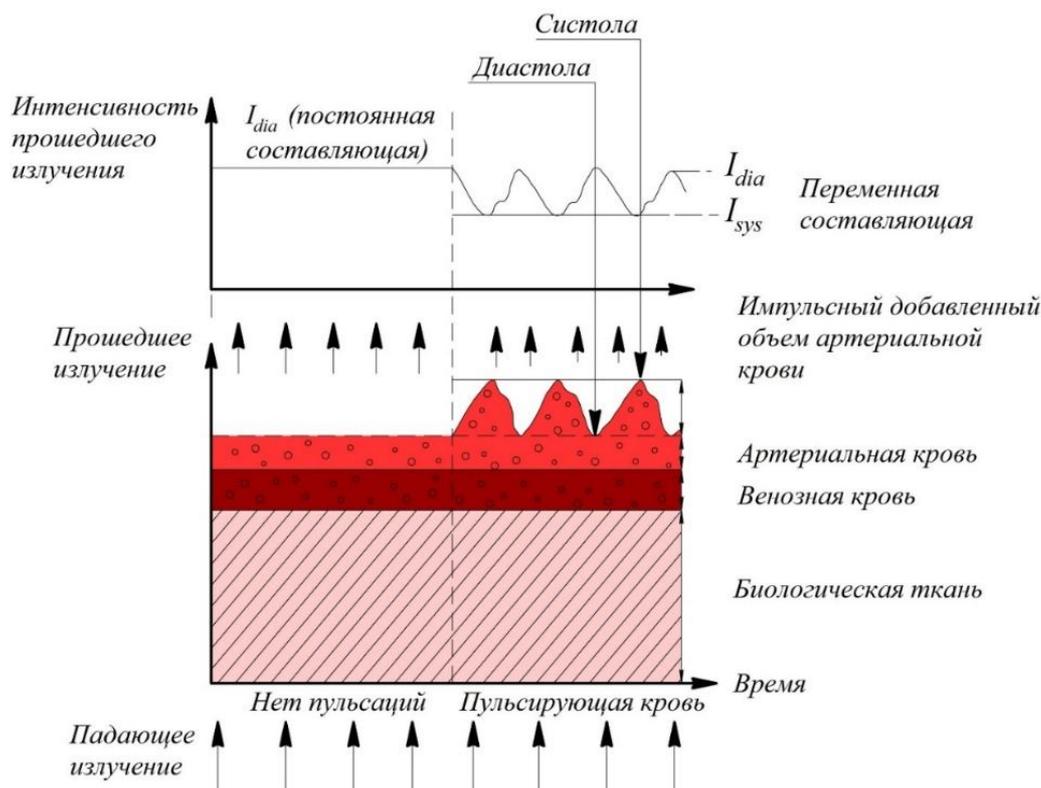


Рис. 3. Иллюстрация процесса формирования фотоплетизмографического сигнала

Fig. 3. Illustration of the process of forming a photoplethysmographic signal

В нижней части рисунка 3 показаны слои ткани, а в верхней части – получаемый фотоплетизмографический сигнал. Постоянная составляющая сигнала определяется при отсутствии пульсаций объема крови. Значение постоянной составляющей медленно изменяется вследствие дыхания и изменений общей концентрации гемоглобина. С учетом пульсирующей составляющей артери-

альной крови, при прохождении монохроматического излучения сквозь биологическую ткань (например, мочку уха) значение интенсивности света на входе фотодетектора изменяется в пределах между максимумом I_{dia} в момент минимального кровенаполнения (диастола) и минимумом I_{sys} в момент максимального кровенаполнения (систола) (рис. 4).

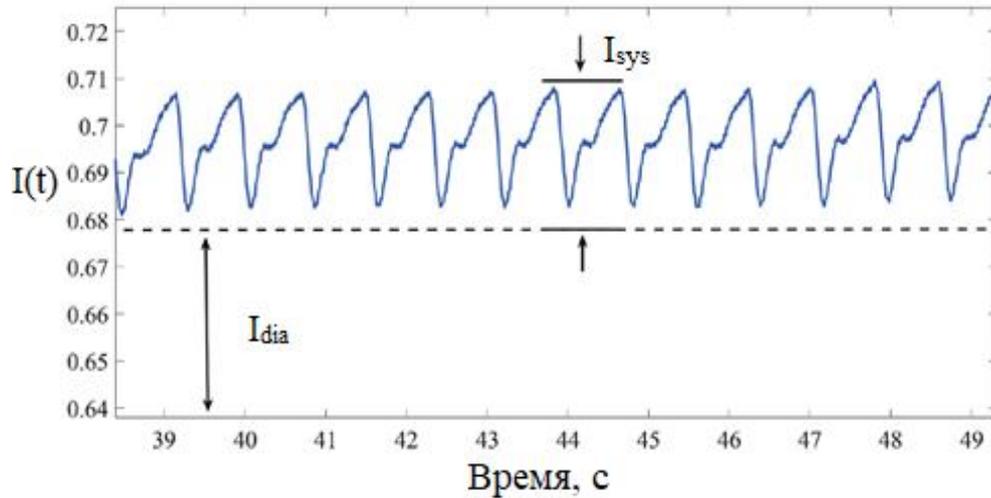


Рис. 4. Уровни постоянной I_{dia} и переменной I_{sys} составляющих фотоплетизмографического сигнала

Fig. 4. Levels of constant I_{dia} and I_{sys} variable components of the photoplethysmographic signal

На начальном этапе разработки математической модели примем, что в составе крови имеют место только две фракции: оксигемоглобин HbO_2 и дезоксигемоглобин Hb , поэтому суммарное поглощение света каждой длины волны определяется компонентами HbO_2 и Hb и тканями.

На основании закона Бугера – Ламберта – Бера, используя пульсовую составляющую крови, можно записать два уравнения для моментов времени, соответствующих максимальному и минимальному кровенаполнению для каждой из длин волн. Таким образом, получим следующую систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\begin{cases} \ln(I_o(\lambda_1)/I_{sys}(\lambda_1)) = \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_1) \cdot C_{HbO_2} d_{k1} + \varepsilon_{Hb}(\lambda_1) \cdot C_{Hb} d_{k1} + \varepsilon(\lambda_1) d_t, \\ \ln(I_o(\lambda_1)/I_{dia}(\lambda_1)) = \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_1) \cdot C_{HbO_2} d_{k2} + \varepsilon_{Hb}(\lambda_1) \cdot C_{Hb} d_{k2} + \varepsilon(\lambda_1) d_t, \\ \ln(I_o(\lambda_2)/I_{sys}(\lambda_2)) = \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_2) \cdot C_{HbO_2} d_{k1} + \varepsilon_{Hb}(\lambda_2) \cdot C_{Hb} d_{k1} + \varepsilon(\lambda_2) d_t, \\ \ln(I_o(\lambda_2)/I_{dia}(\lambda_2)) = \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_2) \cdot C_{HbO_2} d_{k2} + \varepsilon_{Hb}(\lambda_2) \cdot C_{Hb} d_{k2} + \varepsilon(\lambda_2) d_t, \end{cases} \quad (6)$$

где $I_o(\lambda_1)$, $I_o(\lambda_2)$ – интенсивность падающего света для длин волн λ_1 и λ_2 ;

$I_{sys}(\lambda_1)$, $I_{sys}(\lambda_2)$ – интенсивность прошедшего света при максимальном значении кровенаполнения сосуда для длин волн λ_1 и λ_2 ;

d_{k1} – толщина сосуда при максимальном кровенаполнении;

$I_{dia}(\lambda_1)$, $I_{dia}(\lambda_2)$ – интенсивность прошедшего света при минимальном значении кровенаполнения сосуда для длин волн λ_1 и λ_2 ;

d_{k2} – толщина сосуда при минимальном кровенаполнении;

$\varepsilon(\lambda_1)$, $\varepsilon(\lambda_2)$ – коэффициенты молярной экстинкции биологической ткани для длин волн λ_1 и λ_2 ;

d_t – толщина просвечиваемой биологической ткани без учета крови.

Упростим СЛАУ (6) путем вычитания второго и четвертого уравнений из первого и третьего, соответственно, получим

$$\begin{cases} \ln(I_{dia}(\lambda_1)/I_{sys}(\lambda_1)) = (\varepsilon_{HbO_2}(\lambda_1) \cdot C_{HbO_2} + \varepsilon_{Hb}(\lambda_1) \cdot C_{Hb}) \cdot (d_{k1} - d_{k2}), \\ \ln(I_{dia}(\lambda_2)/I_{sys}(\lambda_2)) = (\varepsilon_{HbO_2}(\lambda_2) \cdot C_{HbO_2} + \varepsilon_{Hb}(\lambda_2) \cdot C_{Hb}) \cdot (d_{k1} - d_{k2}). \end{cases} \quad (7)$$

С учётом того, что величины $d_{k1} - d_{k2} = \Delta d_k$ одинаковы для оптического излучения длин волн λ_1 и λ_2 , СЛАУ (7) можно переписать в виде

$$\begin{cases} \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_1) \cdot C_{HbO_2} + \varepsilon_{Hb}(\lambda_1) \cdot C_{Hb} = \frac{\ln(I_{dia}(\lambda_1)/I_{sys}(\lambda_1))}{\Delta d}, \\ \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_2) \cdot C_{HbO_2} + \varepsilon_{Hb}(\lambda_2) \cdot C_{Hb} = \frac{\ln(I_{dia}(\lambda_2)/I_{sys}(\lambda_2))}{\Delta d}. \end{cases} \quad (8)$$

СЛАУ (8) удобно решить относительно неизвестных C_{HbO_2} и C_{Hb} по методу Крамера, в соответствии с которым искомые величины концентраций определяются в следующем виде:

$$C_{HbO_2} = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad C_{Hb} = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad (9)$$

где Δ – определитель матрицы, полученной на основе исходной СЛАУ;

$$\Delta = \begin{vmatrix} \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_1) & \varepsilon_{Hb}(\lambda_1) \\ \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_2) & \varepsilon_{Hb}(\lambda_2) \end{vmatrix};$$

Δ_1 – определитель матрицы, где вместо 1-го столбца стоит столбец правых частей;

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} \frac{\ln(I_{dia}(\lambda_1)/I_{sys}(\lambda_1))}{\Delta d} & \varepsilon_{Hb}(\lambda_1) \\ \frac{\ln(I_{dia}(\lambda_2)/I_{sys}(\lambda_2))}{\Delta d} & \varepsilon_{Hb}(\lambda_2) \end{vmatrix};$$

Δ_2 – определитель матрицы, где вместо 2-го столбца стоит столбец правых частей;

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_1) & \frac{\ln(I_{dia}(\lambda_1)/I_{sys}(\lambda_1))}{\Delta d} \\ \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_2) & \frac{\ln(I_{dia}(\lambda_2)/I_{sys}(\lambda_2))}{\Delta d} \end{vmatrix}.$$

Таким образом,

$$C_{HbO_2} = \frac{\frac{1}{\Delta d} \begin{vmatrix} \ln(I_{dia}(\lambda_1)/I_{sys}(\lambda_1)) & \varepsilon_{Hb}(\lambda_1) \\ \ln(I_{dia}(\lambda_2)/I_{sys}(\lambda_2)) & \varepsilon_{Hb}(\lambda_2) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_1) & \varepsilon_{Hb}(\lambda_1) \\ \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_2) & \varepsilon_{Hb}(\lambda_2) \end{vmatrix}},$$

$$a \quad C_{Hb} = \frac{\frac{1}{\Delta d} \begin{vmatrix} \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_1) & \ln(I_{dia}(\lambda_1)/I_{sys}(\lambda_1)) \\ \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_2) & \ln(I_{dia}(\lambda_2)/I_{sys}(\lambda_2)) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_1) & \varepsilon_{Hb}(\lambda_1) \\ \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_2) & \varepsilon_{Hb}(\lambda_2) \end{vmatrix}}.$$

Воспользовавшись выражением (1) для определения функциональной сату-

рации крови, с учётом упрощений получим

$$SpO_2 = \frac{\frac{\ln(I_{dia}(\lambda_1)/I_{sys}(\lambda_1))}{\ln(I_{dia}(\lambda_2)/I_{sys}(\lambda_2))} \cdot \varepsilon_{Hb}(\lambda_2) - \varepsilon_{Hb}(\lambda_1)}{\frac{\ln(I_{dia}(\lambda_1)/I_{sys}(\lambda_1))}{\ln(I_{dia}(\lambda_2)/I_{sys}(\lambda_2))} \cdot (\varepsilon_{Hb}(\lambda_2) - \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_2)) + \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_1) - \varepsilon_{Hb}(\lambda_1)}. \quad (10)$$

Для получения аналитического решения воспользуемся возможностью разложения величин $\ln(I_{dia}(\lambda_1)/I_{sys}(\lambda_1))$ и $\ln(I_{dia}(\lambda_2)/I_{sys}(\lambda_2))$ в ряд Маклорена в соответствии с формулой

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \dots = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1} x^n}{n}. \quad (11)$$

Для логарифмического соотношения $\frac{\ln(I_{dia}(\lambda_1)/I_{sys}(\lambda_1))}{\ln(I_{dia}(\lambda_2)/I_{sys}(\lambda_2))}$ с учётом только первых двух членов ряда имеем

$$SpO_2 = \frac{\varepsilon_{Hb}(\lambda_1) - R \cdot \varepsilon_{Hb}(\lambda_2)}{\varepsilon_{Hb}(\lambda_1) - \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_1) + R \cdot (\varepsilon_{HbO_2}(\lambda_2) - \varepsilon_{Hb}(\lambda_2))}, \quad (13)$$

где R – аргумент калибровочной зависимости SpO_2 .

В соответствии с аналогичным подходом разработаем математическую мо-

$$\frac{\ln(I_{dia}(\lambda_1)/I_{sys}(\lambda_1))}{\ln(I_{dia}(\lambda_2)/I_{sys}(\lambda_2))} = \frac{\frac{\Delta I(\lambda_1)}{I_{sys}(\lambda_1)} - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta I(\lambda_1)}{I_{sys}(\lambda_1)} \right)^2}{\frac{\Delta I(\lambda_2)}{I_{sys}(\lambda_2)} - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta I(\lambda_2)}{I_{sys}(\lambda_2)} \right)^2}, \quad (12)$$

где $\Delta I(\lambda_1) = I_{dia}(\lambda_1) - I_{sys}(\lambda_1)$, а $\Delta I(\lambda_2) = I_{dia}(\lambda_2) - I_{sys}(\lambda_2)$.

Обозначим равенство 12 как R , тогда искомую величину функциональной сатурации крови SpO_2 можно записать в виде

дель для возможности оценки уровня сатурации крови и учета четырёх фракций гемоглобина в составе крови. В соответствии с (8) получим

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_1) \cdot C_{HbO_2} + \varepsilon_{Hb}(\lambda_1) \cdot C_{Hb} + \varepsilon_{HbCO}(\lambda_1) \cdot C_{HbCO} + \varepsilon_{metHb}(\lambda_1) \cdot C_{metHb} &= \frac{\ln(I_{dia}(\lambda_1) / I_{sys}(\lambda_1))}{\Delta d_{\kappa}}, \\ \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_2) \cdot C_{HbO_2} + \varepsilon_{Hb}(\lambda_2) \cdot C_{Hb} + \varepsilon_{HbCO}(\lambda_2) \cdot C_{HbCO} + \varepsilon_{metHb}(\lambda_2) \cdot C_{metHb} &= \frac{\ln(I_{dia}(\lambda_2) / I_{sys}(\lambda_2))}{\Delta d_{\kappa}}, \\ \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_3) \cdot C_{HbO_2} + \varepsilon_{Hb}(\lambda_3) \cdot C_{Hb} + \varepsilon_{HbCO}(\lambda_3) \cdot C_{HbCO} + \varepsilon_{metHb}(\lambda_3) \cdot C_{metHb} &= \frac{\ln(I_{dia}(\lambda_3) / I_{sys}(\lambda_3))}{\Delta d_{\kappa}}, \\ \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_4) \cdot C_{HbO_2} + \varepsilon_{Hb}(\lambda_4) \cdot C_{Hb} + \varepsilon_{HbCO}(\lambda_4) \cdot C_{HbCO} + \varepsilon_{metHb}(\lambda_4) \cdot C_{metHb} &= \frac{\ln(I_{dia}(\lambda_4) / I_{sys}(\lambda_4))}{\Delta d_{\kappa}}. \end{aligned} \right. \quad (14)$$

Для упрощения записей последующих выражений введем следующие сокращённые обозначения:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_1) &= \varepsilon_{11}; \quad \varepsilon_{Hb}(\lambda_1) = \varepsilon_{21}; \\ \varepsilon_{HbCO}(\lambda_1) &= \varepsilon_{31}; \quad \varepsilon_{metHb}(\lambda_1) = \varepsilon_{41}; \\ \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_2) &= \varepsilon_{12}; \quad \varepsilon_{Hb}(\lambda_2) = \varepsilon_{22}; \\ \varepsilon_{HbCO}(\lambda_2) &= \varepsilon_{32}; \quad \varepsilon_{metHb}(\lambda_2) = \varepsilon_{42}; \\ \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_3) &= \varepsilon_{13}; \quad \varepsilon_{Hb}(\lambda_3) = \varepsilon_{23}; \\ \varepsilon_{HbCO}(\lambda_3) &= \varepsilon_{33}; \quad \varepsilon_{metHb}(\lambda_3) = \varepsilon_{43}; \\ \varepsilon_{HbO_2}(\lambda_4) &= \varepsilon_{14}; \quad \varepsilon_{Hb}(\lambda_4) = \varepsilon_{24}; \\ \varepsilon_{HbCO}(\lambda_4) &= \varepsilon_{34}; \quad \varepsilon_{metHb}(\lambda_4) = \varepsilon_{44}; \\ A(\lambda_1) &= \frac{\ln(I_{dia}(\lambda_1) / I_{sys}(\lambda_1))}{\Delta d_{\kappa}}; \\ A(\lambda_2) &= \frac{\ln(I_{dia}(\lambda_2) / I_{sys}(\lambda_2))}{\Delta d_{\kappa}}; \\ A(\lambda_3) &= \frac{\ln(I_{dia}(\lambda_3) / I_{sys}(\lambda_3))}{\Delta d_{\kappa}}; \\ A(\lambda_4) &= \frac{\ln(I_{dia}(\lambda_4) / I_{sys}(\lambda_4))}{\Delta d_{\kappa}} \end{aligned} \text{ и пере-}$$

пишем СЛАУ (14) в более удобном виде:

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_{11} \cdot C_{HbO_2} + \varepsilon_{21} \cdot C_{Hb} + \varepsilon_{31} \cdot C_{HbCO} + \varepsilon_{41} \cdot C_{metHb} &= A(\lambda_1), \\ \varepsilon_{12} \cdot C_{HbO_2} + \varepsilon_{22} \cdot C_{Hb} + \varepsilon_{32} \cdot C_{HbCO} + \varepsilon_{42} \cdot C_{metHb} &= A(\lambda_2), \\ \varepsilon_{13} \cdot C_{HbO_2} + \varepsilon_{23} \cdot C_{Hb} + \varepsilon_{33} \cdot C_{HbCO} + \varepsilon_{43} \cdot C_{metHb} &= A(\lambda_3), \\ \varepsilon_{14} \cdot C_{HbO_2} + \varepsilon_{24} \cdot C_{Hb} + \varepsilon_{34} \cdot C_{HbCO} + \varepsilon_{44} \cdot C_{metHb} &= A(\lambda_4). \end{aligned} \right. \quad (15)$$

Разделив каждое уравнение системы (15) на C_{HbO_2} , получим

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_{11} + \varepsilon_{21} \cdot C_1 + \varepsilon_{31} \cdot C_2 + \varepsilon_{41} \cdot C_3 &= \frac{A(\lambda_1)}{C_{HbO_2}}, \\ \varepsilon_{12} + \varepsilon_{22} \cdot C_1 + \varepsilon_{32} \cdot C_2 + \varepsilon_{42} \cdot C_3 &= \frac{A(\lambda_2)}{C_{HbO_2}}, \\ \varepsilon_{13} + \varepsilon_{23} \cdot C_1 + \varepsilon_{33} \cdot C_2 + \varepsilon_{43} \cdot C_3 &= \frac{A(\lambda_3)}{C_{HbO_2}}, \\ \varepsilon_{14} + \varepsilon_{24} \cdot C_1 + \varepsilon_{34} \cdot C_2 + \varepsilon_{44} \cdot C_3 &= \frac{A(\lambda_4)}{C_{HbO_2}} \end{aligned} \right. \quad (16)$$

где $C_1 = C_{Hb} / C_{HbO_2}$, $C_2 = C_{HbCO} / C_{HbO_2}$, $C_3 = C_{metHb} / C_{HbO_2}$.

Разделим все уравнения СЛАУ (16) на второе уравнение, введя следующие

обозначения: $R_{12} = \frac{A(\lambda_1)}{A(\lambda_2)}$, $R_{32} = \frac{A(\lambda_3)}{A(\lambda_2)}$,

$R_{42} = \frac{A(\lambda_4)}{A(\lambda_2)}$, получим

$$\begin{cases} R_{12} \cdot \varepsilon_{12} - \varepsilon_{11} = (\varepsilon_{21} - R_{12} \cdot \varepsilon_{22}) \cdot C_1 + (\varepsilon_{31} - R_{12} \cdot \varepsilon_{32}) \cdot C_2 + (\varepsilon_{41} - R_{12} \cdot \varepsilon_{42}) \cdot C_3, \\ R_{32} \cdot \varepsilon_{12} - \varepsilon_{13} = (\varepsilon_{23} - R_{32} \cdot \varepsilon_{22}) \cdot C_1 + (\varepsilon_{33} - R_{32} \cdot \varepsilon_{32}) \cdot C_2 + (\varepsilon_{43} - R_{32} \cdot \varepsilon_{42}) \cdot C_3, \\ R_{42} \cdot \varepsilon_{12} - \varepsilon_{14} = (\varepsilon_{24} - R_{42} \cdot \varepsilon_{22}) \cdot C_1 + (\varepsilon_{34} - R_{42} \cdot \varepsilon_{32}) \cdot C_2 + (\varepsilon_{44} - R_{42} \cdot \varepsilon_{42}) \cdot C_3. \end{cases} \quad (17)$$

Для определения C_1 , C_2 и C_3 воспользуемся методом Крамера, в соответствии с которым: $C_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}$, $C_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta}$,

$C_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta}$. Таким образом, для системы (17) можно записать

$$\Delta = \begin{vmatrix} (\varepsilon_{21} - R_{12} \cdot \varepsilon_{22}) & (\varepsilon_{31} - R_{12} \cdot \varepsilon_{32}) & (\varepsilon_{41} - R_{12} \cdot \varepsilon_{42}) \\ (\varepsilon_{23} - R_{32} \cdot \varepsilon_{22}) & (\varepsilon_{33} - R_{32} \cdot \varepsilon_{32}) & (\varepsilon_{43} - R_{32} \cdot \varepsilon_{42}) \\ (\varepsilon_{24} - R_{42} \cdot \varepsilon_{22}) & (\varepsilon_{34} - R_{42} \cdot \varepsilon_{32}) & (\varepsilon_{44} - R_{42} \cdot \varepsilon_{42}) \end{vmatrix}, \quad (18)$$

$$C_1 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} R_{12} \cdot \varepsilon_{12} - \varepsilon_{11} & (\varepsilon_{31} - R_{12} \cdot \varepsilon_{32}) & (\varepsilon_{41} - R_{12} \cdot \varepsilon_{42}) \\ R_{32} \cdot \varepsilon_{12} - \varepsilon_{13} & (\varepsilon_{33} - R_{32} \cdot \varepsilon_{32}) & (\varepsilon_{43} - R_{32} \cdot \varepsilon_{42}) \\ R_{42} \cdot \varepsilon_{12} - \varepsilon_{14} & (\varepsilon_{34} - R_{42} \cdot \varepsilon_{32}) & (\varepsilon_{44} - R_{42} \cdot \varepsilon_{42}) \end{vmatrix}, \quad (19)$$

$$C_2 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} (\varepsilon_{21} - R_{12} \cdot \varepsilon_{22}) & R_{12} \cdot \varepsilon_{12} - \varepsilon_{11} & (\varepsilon_{41} - R_{12} \cdot \varepsilon_{42}) \\ (\varepsilon_{23} - R_{32} \cdot \varepsilon_{22}) & R_{32} \cdot \varepsilon_{12} - \varepsilon_{13} & (\varepsilon_{43} - R_{32} \cdot \varepsilon_{42}) \\ (\varepsilon_{24} - R_{42} \cdot \varepsilon_{22}) & R_{42} \cdot \varepsilon_{12} - \varepsilon_{14} & (\varepsilon_{44} - R_{42} \cdot \varepsilon_{42}) \end{vmatrix}, \quad (20)$$

$$C_3 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} (\varepsilon_{21} - R_{12} \cdot \varepsilon_{22}) & (\varepsilon_{31} - R_{12} \cdot \varepsilon_{32}) & R_{12} \cdot \varepsilon_{12} - \varepsilon_{11} \\ (\varepsilon_{23} - R_{32} \cdot \varepsilon_{22}) & (\varepsilon_{33} - R_{32} \cdot \varepsilon_{32}) & R_{32} \cdot \varepsilon_{12} - \varepsilon_{13} \\ (\varepsilon_{24} - R_{42} \cdot \varepsilon_{22}) & (\varepsilon_{34} - R_{42} \cdot \varepsilon_{32}) & R_{42} \cdot \varepsilon_{12} - \varepsilon_{14} \end{vmatrix}. \quad (21)$$

Определитель Δ равен

$$\begin{aligned} \Delta = & \varepsilon_{21} \cdot \varepsilon_{32} \cdot \varepsilon_{43} \cdot R_{42} - \varepsilon_{21} \cdot \varepsilon_{32} \cdot \varepsilon_{44} \cdot R_{32} - \varepsilon_{21} \cdot \varepsilon_{33} \cdot \varepsilon_{42} \cdot R_{42} + \varepsilon_{21} \cdot \varepsilon_{33} \cdot \varepsilon_{44} + \varepsilon_{21} \cdot \varepsilon_{34} \cdot \varepsilon_{42} \cdot R_{32} - \\ & - \varepsilon_{21} \cdot \varepsilon_{34} \cdot \varepsilon_{43} - \varepsilon_{22} \cdot \varepsilon_{31} \cdot \varepsilon_{43} \cdot R_{42} + \varepsilon_{22} \cdot \varepsilon_{31} \cdot \varepsilon_{44} \cdot R_{32} + \varepsilon_{22} \cdot \varepsilon_{33} \cdot \varepsilon_{41} \cdot R_{42} - \varepsilon_{22} \cdot \varepsilon_{33} \cdot \varepsilon_{44} \cdot R_{12} - \\ & - \varepsilon_{22} \cdot \varepsilon_{34} \cdot \varepsilon_{41} \cdot R_{32} + \varepsilon_{22} \cdot \varepsilon_{34} \cdot \varepsilon_{43} \cdot R_{12} + \varepsilon_{23} \cdot \varepsilon_{31} \cdot \varepsilon_{42} \cdot R_{42} - \varepsilon_{23} \cdot \varepsilon_{31} \cdot \varepsilon_{44} - \varepsilon_{23} \cdot \varepsilon_{32} \cdot \varepsilon_{41} \cdot R_{42} + \\ & + \varepsilon_{23} \cdot \varepsilon_{32} \cdot \varepsilon_{44} \cdot R_{12} + \varepsilon_{23} \cdot \varepsilon_{34} \cdot \varepsilon_{41} - \varepsilon_{23} \cdot \varepsilon_{34} \cdot \varepsilon_{42} \cdot R_{12} - \varepsilon_{24} \cdot \varepsilon_{31} \cdot \varepsilon_{42} \cdot R_{32} + \varepsilon_{24} \cdot \varepsilon_{31} \cdot \varepsilon_{43} + \\ & + \varepsilon_{24} \cdot \varepsilon_{32} \cdot \varepsilon_{41} \cdot R_{32} - \varepsilon_{24} \cdot \varepsilon_{32} \cdot \varepsilon_{43} \cdot R_{12} - \varepsilon_{24} \cdot \varepsilon_{33} \cdot \varepsilon_{41} + \varepsilon_{24} \cdot \varepsilon_{33} \cdot \varepsilon_{42} \cdot R_{12}. \end{aligned}$$

Определим значение C_1 :

$$C_1 = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} -\varepsilon_{11} \cdot \varepsilon_{32} \cdot \varepsilon_{43} \cdot R_{42} + \varepsilon_{11} \cdot \varepsilon_{32} \cdot \varepsilon_{44} \cdot R_{32} + \varepsilon_{11} \cdot \varepsilon_{33} \cdot \varepsilon_{42} \cdot R_{42} - \varepsilon_{11} \cdot \varepsilon_{33} \cdot \varepsilon_{44} \\ -\varepsilon_{11} \cdot \varepsilon_{34} \cdot \varepsilon_{42} \cdot R_{32} + \varepsilon_{11} \cdot \varepsilon_{34} \cdot \varepsilon_{43} + \varepsilon_{12} \cdot \varepsilon_{31} \cdot \varepsilon_{43} \cdot R_{42} - \varepsilon_{12} \cdot \varepsilon_{31} \cdot \varepsilon_{44} \cdot R_{32} \\ -\varepsilon_{12} \cdot \varepsilon_{33} \cdot \varepsilon_{41} \cdot R_{42} + \varepsilon_{12} \cdot \varepsilon_{33} \cdot \varepsilon_{44} \cdot R_{12} + \varepsilon_{12} \cdot \varepsilon_{34} \cdot \varepsilon_{41} \cdot R_{32} - \varepsilon_{12} \cdot \varepsilon_{34} \cdot \varepsilon_{43} \cdot R_{12} \\ -\varepsilon_{13} \cdot \varepsilon_{31} \cdot \varepsilon_{42} \cdot R_{42} + \varepsilon_{13} \cdot \varepsilon_{31} \cdot \varepsilon_{44} + \varepsilon_{13} \cdot \varepsilon_{32} \cdot \varepsilon_{41} \cdot R_{42} - \varepsilon_{13} \cdot \varepsilon_{32} \cdot \varepsilon_{44} \cdot R_{12} \\ -\varepsilon_{13} \cdot \varepsilon_{34} \cdot \varepsilon_{41} + \varepsilon_{13} \cdot \varepsilon_{34} \cdot \varepsilon_{42} \cdot R_{12} + \varepsilon_{14} \cdot \varepsilon_{31} \cdot \varepsilon_{42} \cdot R_{32} - \varepsilon_{14} \cdot \varepsilon_{31} \cdot \varepsilon_{43} \\ -\varepsilon_{14} \cdot \varepsilon_{32} \cdot \varepsilon_{41} \cdot R_{32} + \varepsilon_{14} \cdot \varepsilon_{32} \cdot \varepsilon_{43} \cdot R_{12} + \varepsilon_{14} \cdot \varepsilon_{33} \cdot \varepsilon_{41} - \varepsilon_{14} \cdot \varepsilon_{33} \cdot \varepsilon_{42} \cdot R_{12} \end{pmatrix}.$$

Определим значение C_2 :

$$C_2 = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \cdot \varepsilon_{22} \cdot \varepsilon_{43} \cdot R_{42} - \varepsilon_{11} \cdot \varepsilon_{22} \cdot \varepsilon_{44} \cdot R_{32} - \varepsilon_{11} \cdot \varepsilon_{23} \cdot \varepsilon_{42} \cdot R_{42} + \varepsilon_{11} \cdot \varepsilon_{23} \cdot \varepsilon_{44} \\ + \varepsilon_{11} \cdot \varepsilon_{24} \cdot \varepsilon_{42} \cdot R_{32} - \varepsilon_{11} \cdot \varepsilon_{24} \cdot \varepsilon_{43} - \varepsilon_{12} \cdot \varepsilon_{21} \cdot \varepsilon_{43} \cdot R_{42} + \varepsilon_{12} \cdot \varepsilon_{21} \cdot \varepsilon_{44} \cdot R_{32} \\ + \varepsilon_{12} \cdot \varepsilon_{23} \cdot \varepsilon_{41} \cdot R_{42} - \varepsilon_{12} \cdot \varepsilon_{23} \cdot \varepsilon_{44} \cdot R_{12} - \varepsilon_{12} \cdot \varepsilon_{24} \cdot \varepsilon_{41} \cdot R_{32} + \varepsilon_{12} \cdot \varepsilon_{24} \cdot \varepsilon_{43} \cdot R_{12} \\ + \varepsilon_{13} \cdot \varepsilon_{21} \cdot \varepsilon_{42} \cdot R_{42} - \varepsilon_{13} \cdot \varepsilon_{21} \cdot \varepsilon_{44} - \varepsilon_{13} \cdot \varepsilon_{22} \cdot \varepsilon_{41} \cdot R_{42} + \varepsilon_{13} \cdot \varepsilon_{22} \cdot \varepsilon_{44} \cdot R_{12} \\ + \varepsilon_{13} \cdot \varepsilon_{24} \cdot \varepsilon_{41} - \varepsilon_{13} \cdot \varepsilon_{24} \cdot \varepsilon_{42} \cdot R_{12} - \varepsilon_{14} \cdot \varepsilon_{21} \cdot \varepsilon_{42} \cdot R_{32} + \varepsilon_{14} \cdot \varepsilon_{21} \cdot \varepsilon_{43} \\ + \varepsilon_{14} \cdot \varepsilon_{22} \cdot \varepsilon_{41} \cdot R_{32} - \varepsilon_{14} \cdot \varepsilon_{22} \cdot \varepsilon_{43} \cdot R_{12} - \varepsilon_{14} \cdot \varepsilon_{23} \cdot \varepsilon_{41} + \varepsilon_{14} \cdot \varepsilon_{23} \cdot \varepsilon_{42} \cdot R_{12} \end{pmatrix}.$$

Определим значение C_3 :

$$C_3 = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} -\varepsilon_{11} \cdot \varepsilon_{22} \cdot \varepsilon_{33} \cdot R_{42} + \varepsilon_{11} \cdot \varepsilon_{22} \cdot \varepsilon_{34} \cdot R_{32} + \varepsilon_{11} \cdot \varepsilon_{23} \cdot \varepsilon_{32} \cdot R_{42} - \varepsilon_{11} \cdot \varepsilon_{23} \cdot \varepsilon_{34} \\ -\varepsilon_{11} \cdot \varepsilon_{24} \cdot \varepsilon_{32} \cdot R_{32} + \varepsilon_{11} \cdot \varepsilon_{24} \cdot \varepsilon_{33} + \varepsilon_{12} \cdot \varepsilon_{21} \cdot \varepsilon_{33} \cdot R_{42} - \varepsilon_{12} \cdot \varepsilon_{21} \cdot \varepsilon_{34} \cdot R_{32} \\ -\varepsilon_{12} \cdot \varepsilon_{23} \cdot \varepsilon_{31} \cdot R_{42} + \varepsilon_{12} \cdot \varepsilon_{23} \cdot \varepsilon_{34} \cdot R_{12} + \varepsilon_{12} \cdot \varepsilon_{24} \cdot \varepsilon_{31} \cdot R_{32} - \varepsilon_{12} \cdot \varepsilon_{24} \cdot \varepsilon_{33} \cdot R_{12} \\ -\varepsilon_{13} \cdot \varepsilon_{21} \cdot \varepsilon_{32} \cdot R_{42} + \varepsilon_{13} \cdot \varepsilon_{21} \cdot \varepsilon_{34} + \varepsilon_{13} \cdot \varepsilon_{22} \cdot \varepsilon_{31} \cdot R_{42} - \varepsilon_{13} \cdot \varepsilon_{22} \cdot \varepsilon_{34} \cdot R_{12} \\ -\varepsilon_{13} \cdot \varepsilon_{24} \cdot \varepsilon_{31} + \varepsilon_{13} \cdot \varepsilon_{24} \cdot \varepsilon_{32} \cdot R_{12} + \varepsilon_{14} \cdot \varepsilon_{21} \cdot \varepsilon_{32} \cdot R_{32} - \varepsilon_{14} \cdot \varepsilon_{21} \cdot \varepsilon_{33} \\ -\varepsilon_{14} \cdot \varepsilon_{22} \cdot \varepsilon_{31} \cdot R_{32} + \varepsilon_{14} \cdot \varepsilon_{22} \cdot \varepsilon_{33} \cdot R_{12} + \varepsilon_{14} \cdot \varepsilon_{23} \cdot \varepsilon_{31} - \varepsilon_{14} \cdot \varepsilon_{23} \cdot \varepsilon_{32} \cdot R_{12} \end{pmatrix}.$$

Таким образом, формула для оценки уровня насыщения крови кислородом при учёте четырёх фракций гемоглобина в составе крови имеет вид

$$SpO_2 = \frac{C_{HbO_2}}{C_{HbO_2} + C_{Hb} + C_{HbCO} + C_{metHb}} = \frac{1}{1 + C_1 + C_2 + C_3}. \quad (22)$$

Дальнейшим этапом исследований в рамках данной статьи является разработка математических моделей рассматриваемых внешних факторов – авиационного шума и вибрации.

В соответствии с [15; 16] методы оценки влияния вибрации на человека включают в себя измерение среднеквадратического значения скорректированного виброускорения по трем ортогональным направлениям действия в соответствии с формулой

$$a_v = \sqrt{k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2}, \quad (23)$$

где a_{wx} , a_{wy} , a_{wz} – среднеквадратичные значения скорректированного виброускорения (вдоль направлений осей координат x , y и z соответственно);

k_x , k_y , k_z – весовые коэффициенты.

Для оценки величины полного среднеквадратического значения скорректированного виброускорения рассмотрим реальные спектры сигналов, полученные с акселерометра, в процессе четырёх полётов (рис. 5).

Анализ полученных спектров сигналов (рис. 5) позволяет установить, что частотами, на которых проявляются наибольшие гармоники виброускорения, являются: 5 Гц, 15 Гц, 20 Гц, 40 Гц, 60 Гц, 65 Гц, 70 Гц, 78 Гц, 82 Гц, 130 Гц, 140 Гц, 157 Гц, 197 Гц, 220 Гц, 250 Гц.

Широкополосная квазидетерминированная вибрация, являющаяся результирующей отдельных частотных составляющих вибрации, направленных по осям x , y и z , может быть представлена в виде суммы n узкополосных составляющих вибрации:

$$A_B(t) = \sum_{i=1}^n a_{vi} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot t + \varphi_i), \quad (24)$$

где a_{vi} – полное среднее квадратическое значение скорректированного виброускорения для частоты f_i .

Рассмотрим пример подобной реализации вибрации (рис. 6).

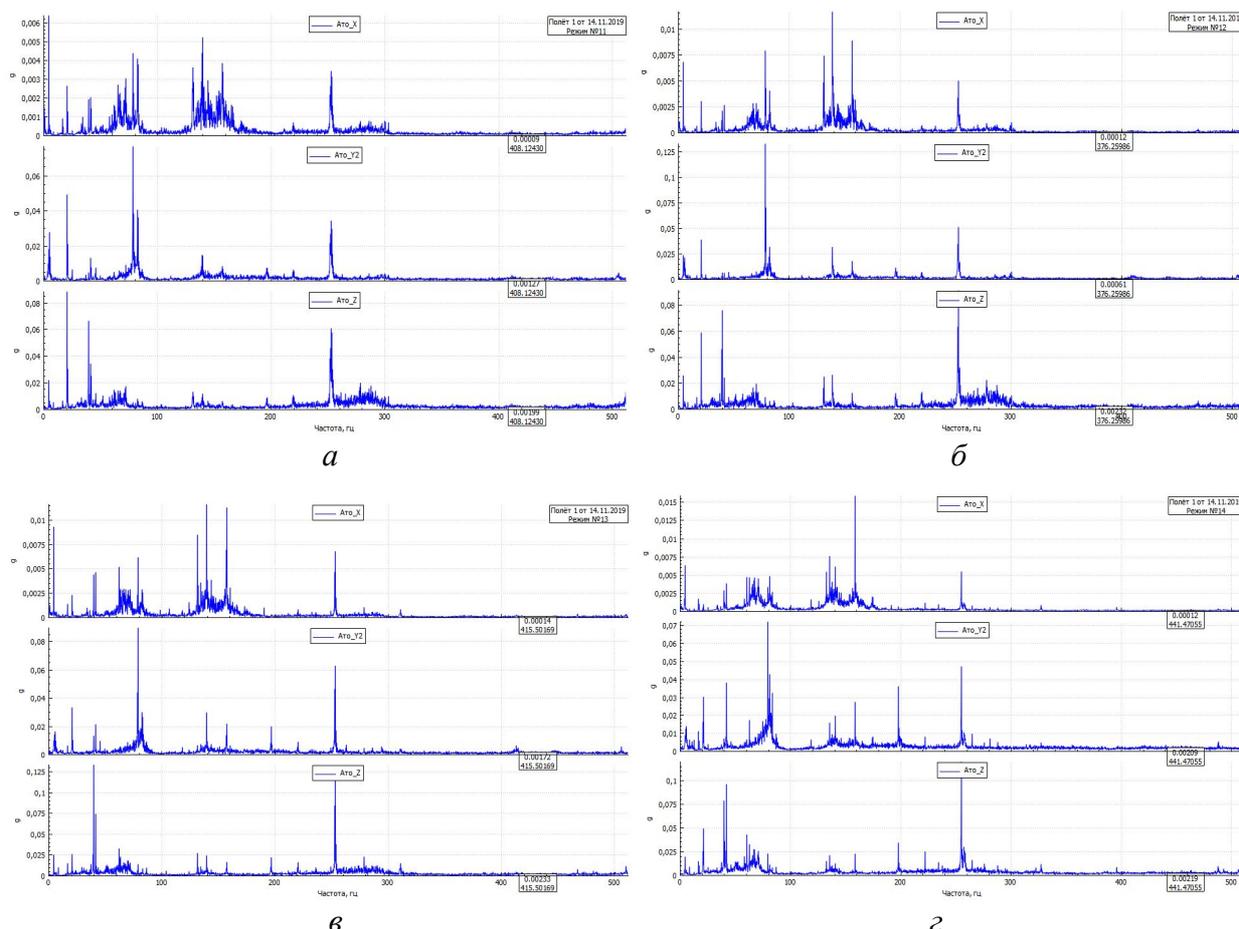


Рис. 5. Примеры спектров реальных сигналов скорректированного виброускорения вдоль направлений осей координат x , y и z : а – полёт 1; б – полёт 2; в – полёт 3; г – полёт 4

Fig. 5. Examples of the spectra of real signals of the corrected vibration acceleration along the directions of the coordinate axes x , y and z : а – flight 1; б – flight 2; в – flight 3; г – flight 4

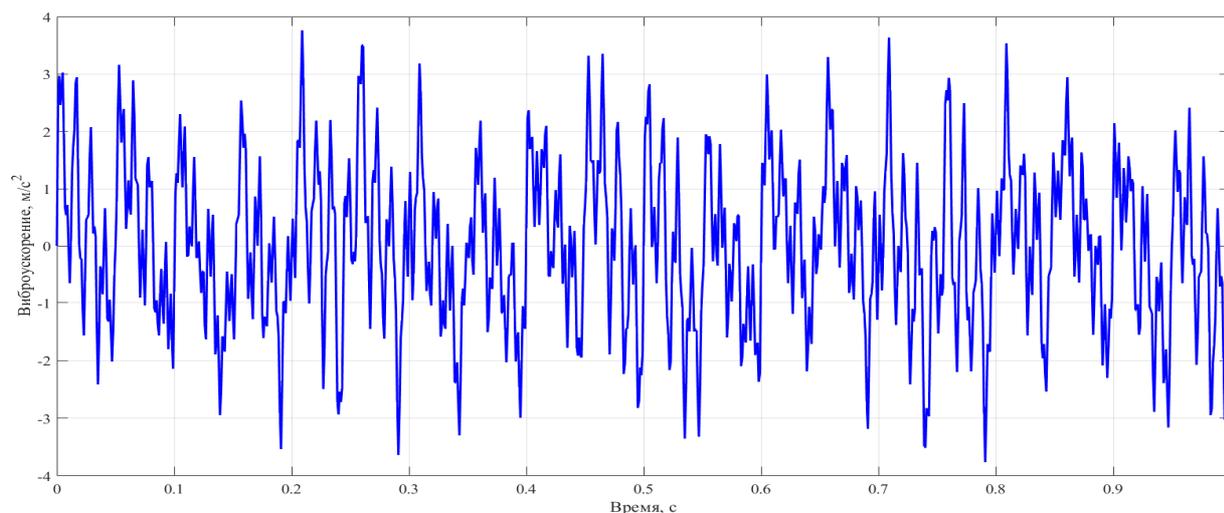


Рис. 6. Реализация широкополосной вибрации

Fig. 6. Implementation of broadband vibration

Авиационный шум моделировался в среде Matlab 2019b с помощью функции `awgn`, позволяющей задать нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и единичным среднеквадратическим отклонением. Применение функции `awgn` дает возможность моделировать шум и нормировать его по отношению к исходному уровню фото-

плетизмографического сигнала через параметр отношения сигнал-шум (ОСШ), выражаемый в дБ.

Результаты и их обсуждение

Для проведения исследования в рамках данной статьи были выбраны следующие длины волн: 660 нм, 805 нм, 880 нм и 940 нм с коэффициентами молярной экстинкции, приведенными в таблице 1 [17].

Таблица 1. Коэффициенты молярной экстинкции компонентов гемоглобина

Table 1. Coefficients of molar extinction of hemoglobin components

Длина волны излучения	$\varepsilon_{HbO_2}(\lambda)$	$\varepsilon_{Hb}(\lambda)$	$\varepsilon_{HbCO}(\lambda)$	$\varepsilon_{metHb}(\lambda)$
660 нм	0,1	0,82	0,061	0,82
805 нм	0,196	0,196	0,015	0,33
880 нм	0,284	0,2	0,005	0,611
940 нм	0,3	0,16	0	0,85

Для оценки уровня сатурации в соответствии с выражениями (13) и (22) изначально необходимо было определить уровни постоянной I_{dia} и переменной I_{sys} составляющих фотоплетизмографических сигналов для каждой выбранной длины волны для двух случаев – при отсутствии влияния рассматриваемых дестабилизирующих факторов и при их наличии. Для первого случая в соответствии с законом (3) с учётом выражения (5) в программе Matlab были смоделированы фотоплетизмографические сигналы, учитывающие только поглощение оксигемоглобином. Во втором

случае рассматривалось влияние авиационного шума и широкополосной вибрации на смоделированные фотоплетизмографические сигналы исходя из предположения, что шум является аддитивной помехой (суммируемой с сигналом), а вибрация – мультипликативной (перемножаемой с сигналом). Анализ постоянных и переменных составляющих фотоплетизмографических сигналов проводился в частотной области, для чего использовалось быстрое преобразование Фурье с количеством точек $N=512$.

Спектры смоделированных фотоплетизмографических сигналов показаны ниже (рис. 7).

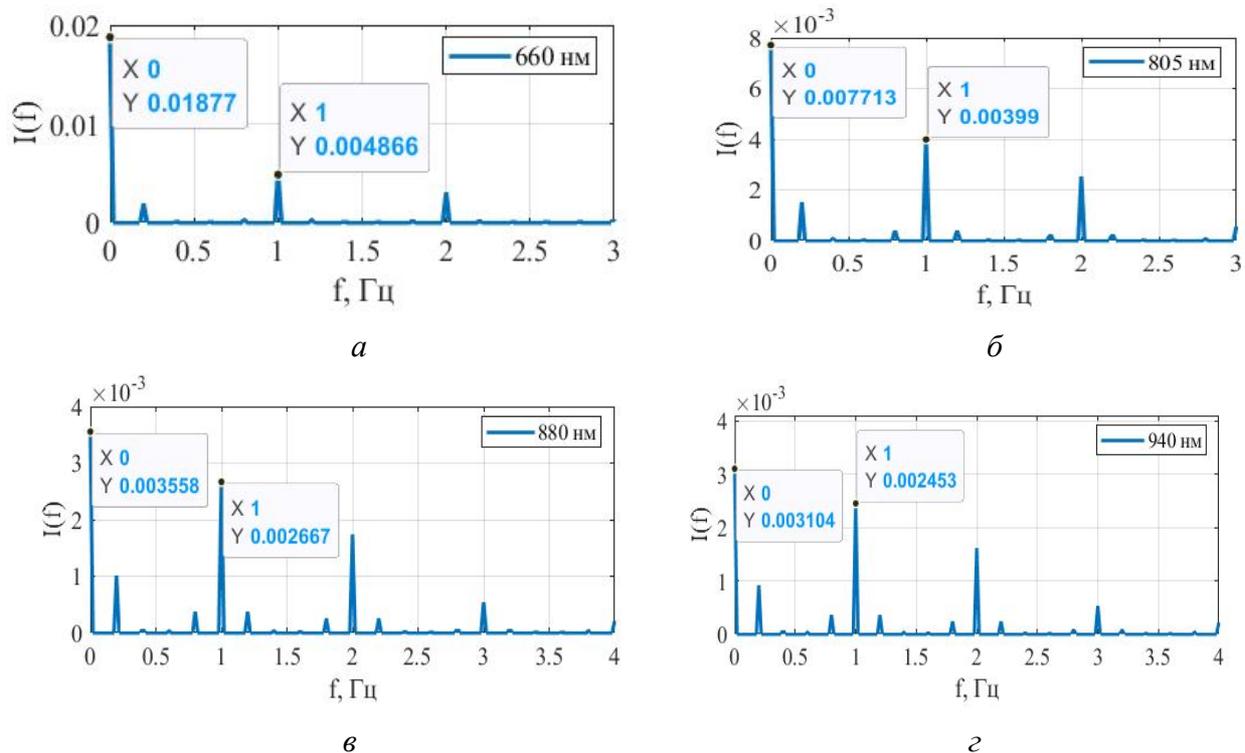


Рис. 7. Спектры фотоплетизмографических сигналов: а – 660 нм; б – 805 нм; в – 880 нм; г – 940 нм

Fig. 7. Spectra of photoplethysmographic signals: а – 660 nm; б – 805 nm; в – 880 nm; г – 940 nm

Воздействие широкополосной квазидетерминированной вибрации на исходные фотоплетизмографические сиг-

налы приводит к существенным изменениям их частотно-временной структуры (рис. 8).

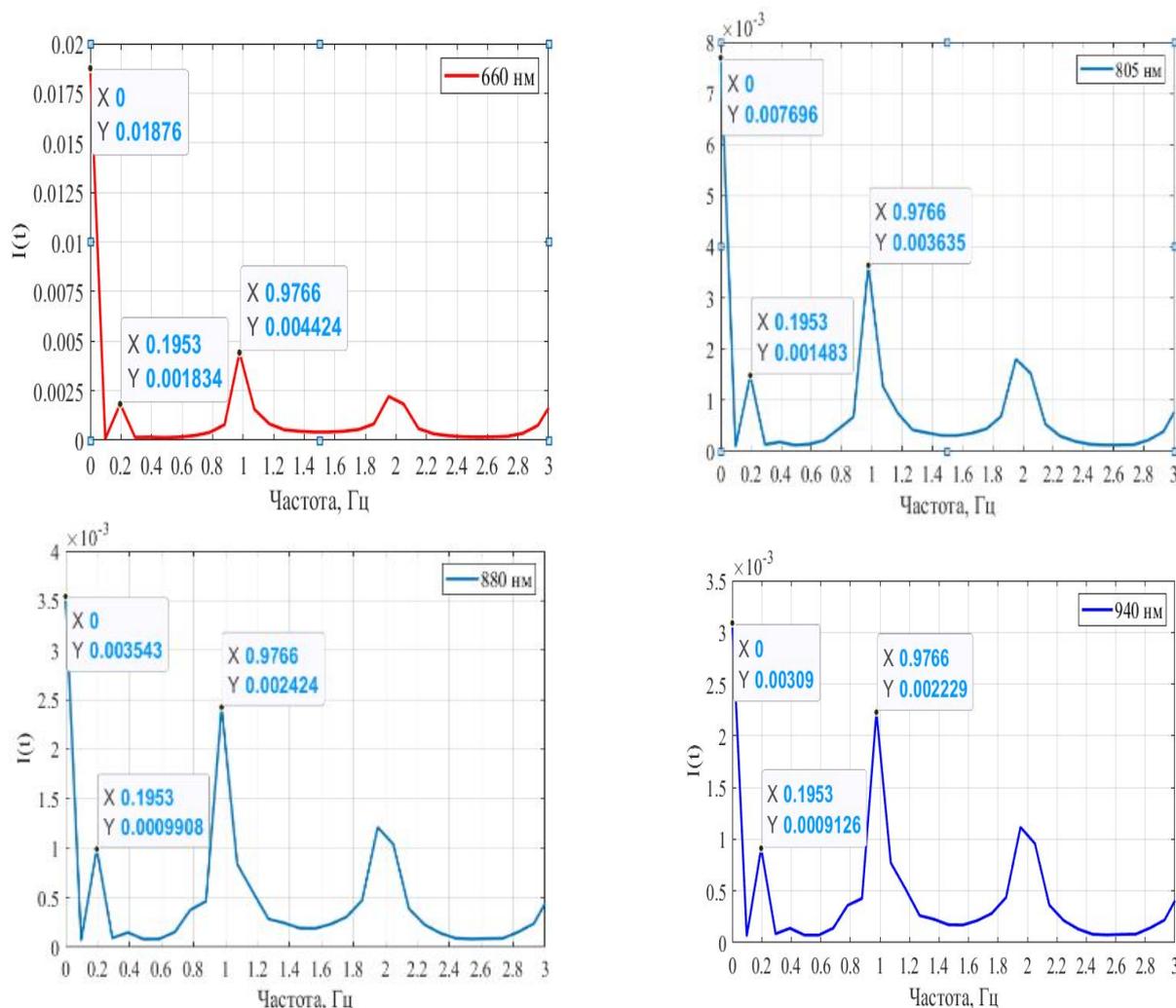


Рис. 8. Спектры фотоплетизмографических сигналов с учётом влияния вибрации

Fig. 8. Spectra of photoplethysmographic signals, taking into account the influence of vibration

Далее представлены некоторые результаты быстрого преобразования Фурье (БПФ) для исходных фотоплетизмографических сигналов с учётом влияния авиационного шума различного уровня (рис. 9).

На основе разработанных математических моделей (13) и (22), с учётом по-

лученных спектров фотоплетизмографических сигналов были получены следующие результаты оценки уровня насыщения крови кислородом (табл. 2). В качестве меры точности полученных результатов в соответствии с [18; 19; 20] принималось значение абсолютной погрешности.

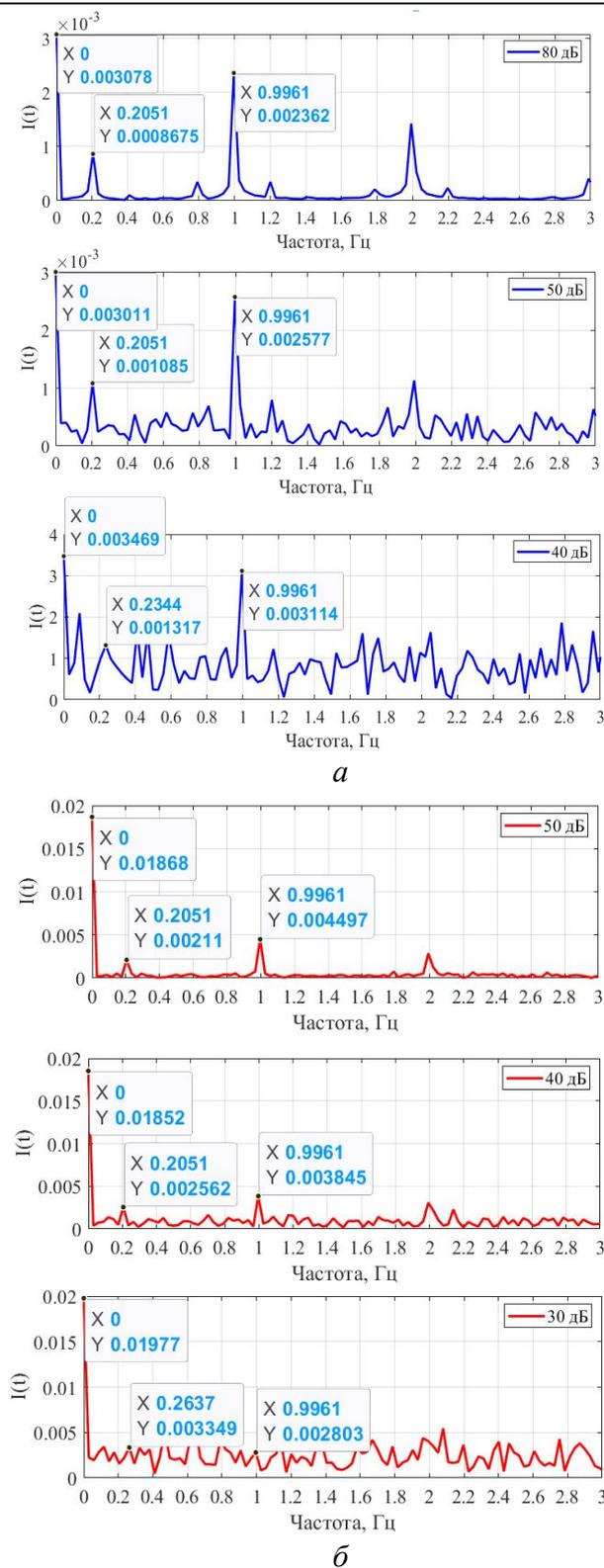


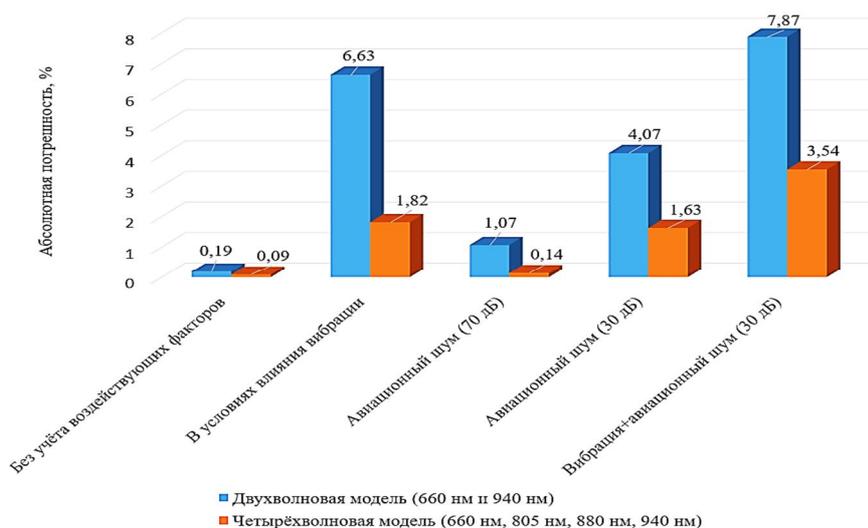
Рис. 9. Примеры спектров фотоплетизмографического сигнала красного канала (660 нм) (а) и инфракрасного канала (940 нм) (б) с учётом воздействия шума различного уровня

Fig. 9. Examples of the spectra of the photoplethysmographic signal of the red channel (660 nm) (а) and the infrared channel (940 nm) (б) taking into account the impact of noise at various levels

Таблица 2. Результаты математического моделирования по оценке уровня насыщения крови кислородом при условии воздействия вибрации и авиационного шума**Table 2.** The results of mathematical modeling for assessing the level of blood oxygen saturation under the condition of exposure to vibration and aircraft noise

Значение SpO_2 и абсолютной погрешности, %	Наборы длин волн	
	660 нм и 940 нм	660 нм, 805 нм, 880 нм, 940 нм,
Без учёта воздействующих факторов		
SpO_2 , %	99,81	99,91
Абсолютная погрешность, %	0,19	0,09
В условиях влияния вибрации		
SpO_2 , %	93,37	98,18
Абсолютная погрешность, %	6,63	1,82
Авиационный шум (70 дБ)		
SpO_2 , %	98,93	99,86
Абсолютная погрешность, %	1,07	0,14
Авиационный шум (30 дБ)		
SpO_2 , %	95,93	98,37
Абсолютная погрешность, %	4,07	1,63
Вибрация + авиационный шум (30 дБ)		
SpO_2 , %	92,13	96,46
Абсолютная погрешность, %	7,87	3,54

Рассмотрим графическую интерпретацию полученных результатов (рис. 10).

**Рис. 10.** Снижение абсолютной погрешности при оценке уровня сатурации при использовании четырёхволновой модели, учитывающей поглощение в дисфункциональных фракциях гемоглобина**Fig. 10.** Reducing the absolute error in assessing the level of saturation when using a four-wave model that takes into account absorption in dysfunctional hemoglobin fractions

Применение четырёхволновой модели по сравнению с «классической» двухволновой позволяет снизить абсолютную погрешность при оценке уровня сатурации крови: в условиях влияния широкополосной квазигармонической вибрации – в 3,64 раза; в условиях влияния авиационного шума (70 дБ) и (30 дБ) – в 7,64 и 2,5 раза соответственно; в условиях влияния комплексного воздействия названных факторов – в 2,22 раза.

Выводы

Таким образом, анализ полученных результатов модельных исследований

позволяет говорить о том, что увеличение количества источников оптического излучения с заданными спектральными характеристиками позволяет повысить точность оценки уровня насыщения крови кислородом в условиях влияния внешних дестабилизирующих полётных факторов. Для адекватной оценки функционального состояния пилота по значениям его физиологических показателей, в частности, уровню насыщения крови кислородом, необходимо использование средств диагностики на базе многоволновой пульсовой оксиметрии, позволяющих оценивать уровень фракционной сатурации.

Список литературы

1. Основы авиационной и космической медицины / под ред. И. Б. Ушакова. М.: Слово, 2007. 344 с.
2. Мухин И. Е., Селезнев С. Л., Коптев Д. С. Направления и практические результаты создания методов и средств диагностики и прогностики состояния авиационного комплекса «человек – машина» // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2017. Т. 7, № 3 (24). С. 46-57.
3. Мухин И. Е., Дворников М. В., Коптев Д. С. Подсистема контроля физиологического состояния пилота как одного из звеньев биотехнической системы эргатического типа «пилот – самолёт – окружающая среда» // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2017. Т. 7, № 4 (25). С. 59-69.
4. Годунов А. И., Куатов Б. Ж., Сущик Д. М. Алгоритмы контроля действий лётного экипажа по управлению летательным аппаратом // Вестник Карагандинского государственного университета. Серия: Математика. 2015. № 1 (19). С. 15-24.
5. Алексеенко М. С. Личностный потенциал в практике психологического обеспечения лётной деятельности // Психология и психотехника. 2021. № 4. С. 111-131.
6. Оценка функционального состояния организма летчиков во время смоделированного полета на тренажере / В. В. Сериков, О. И. Юшкова, В. Е. Богданова,

Е. В. Зибарев, А. Ю. Форверц // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Биология и экология. 2020. № 1(57). С. 17-30.

7. Руководство по авиационной медицине. URL: http://www.icao.int/publications/Documents/8984_con_s_ru.pdf (дата обращения: 08.02.2022).

8. Влияние курения на состояние кислородтранспортной системы крови юношей в зависимости от уровня их двигательной активности / Т. В. Антипина, Е. Е. Исаева, В. Г. Шамратова, С. Р. Усманова // Физическая культура, спорт – наука и практика. 2019. № 1. С. 78-83.

9. Hampson N. B., Scott K. L. Use of a noninvasive pulse CO-oximeter to measure blood carboxyhemoglobin levels in bingo players // Respiratory care. 2006. Vol. 51. P. 758–760.

10. US Patent 5.842.979. Method and apparatus for improved photoplethymographic monitoring of oxyhemoglobin, deoxyhemoglobin, carboxyhemoglobin and methemoglobin / Jarman K. H. Announced on 14.02.97; published 01.12.88.

11. Multi-wavelength pulse oximetry: theory for the future / T. Aoyagi, M. Fuse, N. Kobayashi, K. Machida, K. Miyasaka // Anesthesia and analgesia. 2007. Vol. 105. P. S53–58.

12. Measurement of carboxyhemoglobin and methemoglobin by pulse oximetry: a human volunteer study / S. J. Barker, J. Curry, D. Redford, S. Morgan // Anesthesiology. 2006. Vol. 105. P. 892–897.

13. Shapovalov V. V., Dudnikov S. Y., Zagorsky I. G., Gurevich B. S. A non-invasive method for spectroscopic blood glucose monitoring // Modern technologies in medicine. 2019. Vol. 11(2). P. 110–114. <https://doi.org/10.17691/stm2019.11.2.16>.

14. Lambert J. Photometria, sive de mensure et gradibus luminis, colorum et mubrac // Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, 1892. P. 31-33.

15. ГОСТ 31191.1-2004. Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Часть 1. Общие требования. URL: <http://www.docs.cntd.ru/document/1200060904> (дата обращения: 08.02.2022).

16. Yao J., Warren S. A short study to assess the potential of independent component analysis for motion artifact separation in wearable pulse oximeter signals // Proc. 27th Annu. Conf. IEEE Eng. Med. Biol., 2005. P. 3585-3588.

17. Noninvasive Optical, Electrical, and Acoustic Methods of Total Hemoglobin Determination / J. W. McMurdy, G. D. Jay, S. Suner, G. Crawford // Clinical Chemistry. 2008. Vol. 54(2). P. 264-272.

18. ГОСТ ISO 9919-2011. Изделия медицинские электрические. Частные требования безопасности и основные характеристики пульсовых оксиметров. URL: <http://www.docs.cntd.ru/document/1200100803> (дата обращения: 07.02.2022).

19. Calibration-free pulse oximetry based on two wavelengths in the infrared – a preliminary study / M. Nitzan, S. Noach, E. Tobal, Y. Adar, Y. Miller, E. Shalom, S. Engelberg // *Sensors*. 2014. N 14 (4). P. 7420-7434.

20. Doshi R., Panditrao A. Non-Invasive Optical Sensor for Hemoglobin Determination // *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*. 2013. N 3. P. 559-62.

References

1. Osnovy aviatsionnoi i kosmicheskoi meditsiny [Fundamentals of aviation and space medicine]; ed. by I. B. Ushakov. Moscow, Slovo Publ., 2007. 344 p.

2. Mukhin I. E., Seleznev S. L., Koptev D. S. Napravleniya i prakticheskie rezul'taty sozdaniya metodov i sredstv diagnostiki i prognostiki sostoyaniya aviatsionnogo kompleksa "chlovek – mashina" [Directions and practical results of creating methods and tools for diagnosing and predicting the state of the aviation complex "man – machine"]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Technology, Informatics. Medical Instrumentation*, 2017, vol. 7, no. 3 (24), pp. 46-57.

3. Mukhin I. E., Dvornikov M. V., Koptev D. S. Podsystema kontrolya fiziologicheskogo sostoyaniya pilota kak odnogo iz zven'ev biotekhnicheskoi sistemy ergaticheskogo tipa "pilot – samolet – okruzhayushchaya sreda" [The subsystem for monitoring the physiological state of the pilot as one of the links of the biotechnical system of the ergatic type "pilot – aircraft – environment"]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Technology, Informatics. Medical Instrumentation*, 2017, vol. 7, no. 4 (25), pp. 59-69.

4. Godunov A. I., Kumatov B. Zh., Suschik D. M. Algoritmy kontrolya deistvii letnogo ekipazha po upravleniyu letatel'nyim apparatom [Sushchik Algorithms for controlling the actions of the flight crew in controlling the aircraft]. *Vestnik Karagandinskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematika = Bulletin of Karaganda State University. Series: Mathematics*, 2015, no. 1 (19), pp. 15-24.

5. Alekseenko M. S. Lichnostnyi potentsial v praktike psikhologicheskogo obespecheniya letnoi deyatel'nosti [Personal potential in the practice of psychological support for flight activity]. *Psikhologiya i Psihhotekhnika = Psychology and Psychotechnics*, 2021, no. 4, pp. 111–131.

6. Serikov V.V., Yushkova O. I., Bogdanova V. E., Zibarev E. V., Forverts A. Yu. Otsenka funktsional'nogo sostoyaniya organizma letchikov vo vremya smodelirovannogo poleta na trenazhere [Evaluation of the functional state of the body of pilots during a simulated flight on a simulator]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologiya i ekologiya = Bulletin of Tver State University. Series: Biology and Ecology. Series: Biology and Ecology*, 2020, no. 1(57), pp. 17-30.
7. Rukovodstvo po aviatsionnoi meditsine [Guide to aviation medicine]. Available at: http://www.icao.int/publications/Documents/8984_con_s_ru.pdf. (accessed 08.02.2022)
8. Antipina T. V., Isaeva E. E., Shamratova V. G., Usmanova S. R. Vliyanie kureniya na sostoyanie kislorodtransportnoi sistemy krovi yunoshei v zavisimosti ot urovnya ikh dvigatel'noi aktivnosti [The influence of smoking on the state of the oxygen transport system of the blood of young men depending on the level of their physical activity]. *Fizicheskaya kul'tura, sport – nauka i praktika = Physical Culture, Sport – Science and Practice*, 2019, no. 1, pp. 78-83.
9. Hampson N. B., Scott K. L. Use of a noninvasive pulse CO-oximeter to measure blood carboxyhemoglobin levels in bingo players. *Respiratory Care*, 2006, vol. 51, pp. 758–760.
10. Jarman K. H. Method and apparatus for improved photoplethymographic monitoring of oxyhemoglobin, deoxyhemoglobin, carboxyhemoglobin and methemoglobin. Patent US, no. 5.842.979, 1998.
11. Aoyagi T., Fuse M., Kobayashi N., Machida K., Miyasaka K. Multi-wavelength pulse oximetry: theory for the future. *Anesthesia and Analgesia*, 2007, vol. 105, pp. S53–58.
12. Barker S. J., Curry J., Redford D., Morgan S. Measurement of carboxyhemoglobin and methemoglobin by pulse oximetry: a human volunteer study. *Anesthesiology*, 2006, vol. 105, pp. 892–897.
13. Shapovalov V. V., Dudnikov S. Y., Zagorsky I. G., Gurevich B. S. A non-invasive method for spectroscopic blood glucose monitoring. *Modern Technologies in Medicine*, 2019, no. 11(2), pp. 110–114. <https://doi.org/10.17691/stm2019.11.2.16>
14. Lambert J. Photometria, sive de mensura et gradibus luminis, colorum et mubrac. Ostwald's Klassiker den exakten. Wissenschaften, 1892, pp. 31-33.
15. GOST 31191.1-2004. Vibratsiya i udar. Izmerenie obshchei vibratsii i otsenka ee vozdeistviya na cheloveka. Chast' 1. Obshchie trebovaniya [Vibration and shock. Measurement of general vibration and assessment of its impact on a person. Part 1. General requirements]. Available at: <http://www.docs.chtd.ru/document/1200060904>. (accessed 08.02.2022)
16. Yao J., Warren S.. A short study to assess the potential of independent component analysis for motion artifact separation in wearable pulse oximeter signals. Proc. 27 th Annu. Conf. IEEE Eng. Med. Biol., 2005, pp. 3585-3588.

17. McMurdy J. W., Jay G. D., Suner S., Crawford G.. Noninvasive Optical, Electrical, and Acoustic Methods of Total Hemoglobin Determination. *Clinical Chemistry*, 2008, vol. 54(2), pp. 264-272.

18. GOST ISO 9919-2011. Izdeliya meditsinskie elektricheskie. Chastnye trebovaniya bezopasnosti i osnovnye kharakteristiki pul'sovykh oksimetrov [Medical electrical products. Particular safety requirements and the main characteristics of pulse oximeters.]. Available at: <http://www.docs.cntd.ru>document/1200100803>. (accessed 07.02.2022)

19. Nitzan M., Noach S., Tobal E., Adar Y., Miller Y., Shalom E., Engelberg S. Calibration-free pulse oximetry based on two wavelengths in the infrared – a preliminary study. *Sensors*, 2014, no. 14 (4), pp. 7420–7434.

20. Doshi R., Panditrao A. Non-Invasive Optical Sensor for Hemoglobin Determination. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2013, no. 3, pp. 559-62.

Информация об авторе / Information about the Author

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

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

Юдин Илья Сергеевич, студент кафедры конституционного права, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: angry_bender@mail.ru

Ilya S. Yudin, Student of the Department of Constitutional Law, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: angry_bender@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-121-134>



Модельные исследования возможности широкополосной электроимпедансной спектроскопии по обнаружению и различению ишемических и геморрагических инсультов

К. С. Бразовский^{1,2} ✉, Д. А. Винокурова¹, Е. С. Королюк²

¹ Сибирский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации
Московский тракт 2, г. Томск 634050, Российская Федерация

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет
пр. Ленина 30, г. Томск 634050, Российская Федерация

✉ e-mail: mbc@tpu.ru

Резюме

Цель исследования заключается в изучении факторов, влияющих на детекцию и дифференцировку очагов нарушения кровообращения с помощью широкополосных измерений параметров электрического импеданса.

Методы. Измерения проведены на анатомически реалистичном фантоме головы, состоящем из трех компонентов, имитирующих скальп, костные структуры и головной мозг. Моделирование очагов нарушения кровообращения проводилось путем инъекции водных растворов хлорида натрия различной концентрации. Использована измерительная установка собственной разработки, обеспечивающая широкополосные измерения в полосе частот от 10 кГц до 1 МГц и базовую погрешность не более 1 %.

Результаты. Ранняя диагностика нарушений мозгового кровообращения является необходимым условием успешного лечения и последующей реабилитации. Наилучшими диагностическими возможностями обладает метод компьютерной томографии, однако он доступен только в стационарах. Электроимпедансная спектроскопия как метод оценки электрических параметров биологических тканей потенциально может быть использована как способ экспресс-диагностики на догоспитальном этапе. В статье представлены результаты численного и фантомного моделирования возможностей электроимпедансной спектроскопии по обнаружению и дифференциации ишемических и геморрагических очагов.

© Бразовский К. С., Винокурова Д. А., Королюк Е. С., 2022

Заключение. Широкополосная электроимпедансная спектроскопия может рассматриваться как перспективный метод скрининга нарушений мозгового кровообращения, однако имеет ряд ограничений, которые должны быть приняты во внимание при разработке биотехнических систем для клинического применения. В частности, минимальный размер детектируемого очага ишемического повреждения зависит от разрешающей способности и динамического диапазона системы. Для обнаружения очагов объемом не более 5 мл, расположенных близко к электродам, необходим динамический диапазон системы не менее 60 Дб. При типичных для электроимпедансных систем значениях около 40 Дб минимально детектируемый объем возрастает до 30 мл.

Ключевые слова: инсульт; электроимпедансная спектроскопия; моделирование; фантом; экспресс-метод диагностики.

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

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта № 19-415-700005.

Для цитирования: Бразовский К. С., Винокурова Д. А., Королюк Е. С. Модельные исследования возможности широкополосной электроимпедансной спектроскопии по обнаружению и различению ишемических и геморрагических инсультов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 2. С. 121–134. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-121-134>.

Поступила в редакцию 01.04.2022

Подписана в печать 30.04.2022

Опубликована 27.06.2022

Modeling the Ability of Wide Band Electrical Impedance Spectroscopy to Detect and Differentiate Ischemic And Hemorrhagic Brain Stroke

Konstantin S. Brazovskii^{1,2} ✉, Daria A. Vinokurova¹, Evgenii S. Koroluk²

¹ Siberian State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation
2 Moskovskii tract, Tomsk 634050, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University
30 Lenina Ave., Tomsk 634050, Russian Federation

✉ e-mail: mbc@tpu.ru

Abstract

The purpose of research is focused on factors affecting the detection and differentiation of circulatory disorders using broadband measurements of electrical impedance parameters.

Methods. The measurements were conducted using an anatomically realistic head phantom consisting that contained three major components simulating the scalp, skull and the brain. The pathological foci were simulated by injection of sodium chloride dissolved in distilled water. A purpose made measuring setup that provides wideband electrical impedance measurements in the frequency range from 10 kHz to 1 MHz and a basic error of no more than 1% was used.

Results. *Early diagnosis of brain stroke is a necessary condition for successful treatment and subsequent rehabilitation. Computed tomography has the most advanced diagnostic capabilities, but it can be used only in hospitals. Electrical impedance spectroscopy, a method to measure the electrical parameters of biological tissues, can potentially be used for early diagnosis at the pre-hospital stage. The article presents the results of numerical and phantom modeling aimed to study the ability of electrical impedance spectroscopy to detect and differentiate ischemic and hemorrhagic types of brain stroke.*

Conclusion. *Wideband electrical impedance spectroscopy can be considered as a promising cerebrovascular screening method. However, it has some limitations that should be addressed to develop biotechnical systems for clinical applications. In particular, the minimum size of a detected ischemic lesion depends on the resolution and dynamic range of the system. To detect foci with a volume of no more than 5 ml, located close to the electrodes, a dynamic range of the system must be at least 60 dB. Systems with typical dynamic range of 40 dB the minimal detectable volume increases up to 30 ml.*

Keywords: *brain stroke, electrical impedance spectroscopy, modeling, phantom, early diagnosis.*

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

Financing: *The project is supported by RFBR and Tomsk region, scientific project № 19-415-700005.*

For citation: Brazovskii K. S., Vinokurova D. A., Koroluk E. S. Modeling the Ability of Wide Band Electrical Impedance Spectroscopy to Detect and Differentiate Ischemic And Hemorrhagic Brain Stroke. *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.* 2022; 12(2): 121–134. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-121-134>.

Received 01.04.2022

Accepted 30.04.2022

Published 27.06.2022

Введение

Согласно данным Всемирной организации здравоохранения [1], мозговые кровоизлияния являются второй по частоте причиной смерти и третьей причиной инвалидизации. Вероятность развития необратимых осложнений и степень их тяжести напрямую зависят от качества диагностики и оказания специализированной медицинской помощи на ранних этапах развития патологического процесса. «Золотым стандартом» диагностики локализации и типа инсульта в настоящее время является компьютерная томография (КТ), однако этот метод может быть применен только в условиях стационара.

Разработка новых способов определения типа нарушений мозгового кровообращения для ранней диагностики с возможностью использования в условиях скорой помощи является актуальной задачей. В работе [2] приведены результаты сравнительных исследований многочастотной электроимпедансной томографии (ЭИТ), магнито-резонансной и компьютерной томографии с целью определения чувствительности и специфичности ЭИТ при дифференцировке типа кровоизлияния. Авторами была продемонстрирована техническая возможность проведения подобных измерений и создана референсная база данных, содержащая исследования как

добровольцев без нарушений мозгового кровообращения, так и пациентов с подтвержденным диагнозом ишемического или геморрагического инсульта. В этой работе диапазон частот зондирующего тока составил от 5 Гц до 2 кГц.

В настоящее время электроимпедансные методы не имеют широкого клинического применения, поскольку отсутствуют данные, подтверждающие их диагностические возможности. Проблема получения необходимых измерений заключается в том, что электроимпедансные измерения не являются абсолютными, результаты зависят как от геометрии области исследования, так и от электрических параметров биологических тканей. Как следствие, общепринятые способы проведения доклинических и клинических исследований не позволяют получить необходимый и достаточный объем информации с высокой степенью доказательности. В большинстве случаев моделирование кровоизлияния проводится на моделях с участием крупных лабораторных животных, после чего проводятся измерения с участием пациентов. Однако в случае электроимпедансных измерений, учитывая зависимость результатов измерения от геометрии изучаемой области, такой подход не позволяет получить результаты, однозначно переносимые на измерения с участием пациентов [3]. Как следствие, большинство опубликован-

ных результатов, посвященных электроимпедансным методам определения типа нарушения мозгового кровообращения, получены на численных и моделях и физических фантомах.

Проблеме классификации патологических процессов посвящено большое количество исследований, которые предлагают различные подходы к анализу и интерпретации данных. В частности, в работе [4] предложен способ преобразования многомерных данных в двумерные распределения с последующей классификацией полученных объектов. Модели данных на основе нечеткой логики [5; 6] находят применение для решения сложных задач оценки состояния когнитивных функций и интегральных параметров здоровья. Более сложные нейросетевые модели [7; 8; 9] используются для реконструкции электроимпедансных изображений и обнаружения очагов кровоизлияний. Несмотря на большие возможности, нейросетевые модели характеризуются существенным недостатком: для их обучения требуется очень большое количество наблюдений, которое невозможно получить, проводя исследования пациентов. Как следствие, в большинстве опубликованных работ для обучения нейронных сетей используются синтезированные данные или результаты измерения на анатомических достоверных фантомах. Проведенный анализ научно-технических источников показал, что наиболее полные данные о

возможности обнаружения и дифференцировки типа кровоизлияния получены в диапазоне частот зондирующего тока от единиц герц до 20 кГц [10]. В работе [11] были выявлены значительные расхождения между результатами измерений в диапазоне частот до 1 МГц, проведенных разными научными группами. Наибольшие расхождения измерений в верхней части спектра наблюдаются при моделировании ишемического поражения головного мозга. По нашему мнению, эти расхождения могут быть объяснены как различием использованных моделей *in vivo*, так и метрологическими характеристиками использованной аппаратуры. Проблема недостаточной воспроизводимости электроимпедансных измерений *in vivo* хорошо известна, но, к сожалению, приемлемого решения до настоящего времени не найдено. Для успешного применения современных методов классификации электроимпедансных измерений необходимо синтезировать большое количество обучающих репрезентативных данных, близких к реально измеряемым значениям. Одним из возможных подходов к решению этой задачи является использование реалистичных фантомов, электрические параметры которых допускают контролируемые изменения в широком диапазоне значений. В представленной работе приведены результаты исследования характеристик электроимпедансной спектроскопии при измерении электрических

параметров фантома, имитирующего строение головы человека. Измерения проводились в расширенном диапазоне частот от 20 Гц до 1 МГц.

Материалы и методы

Для проведения измерений был создан анатомически достоверный фантом, имитирующий геометрические и электрические параметры биологических тканей головы человека. В качестве исходных данных были использованы архивные томографические изображения головного мозга здоровых людей и пациентов с нарушениями мозгового кровообращения. Изображения были сегментированы (разделены на отдельные биологические ткани) и преобразованы в конечно-элементную трехмерную модель. Затем на основе модели методом трехмерной печати был изготовлен фантом, частично воспроизводящий черепную коробку (рис. 1). Электроды размещались в соответствии со стандартной схемой «10/20», принятой в нейрофизиологии.

Внутренняя полость фантома заполнялась желатином, приготовленным на солевом растворе с концентрацией от 0,05 до 0,9 % NaCl. Изменение концентрации хлорида натрия позволяет изменять удельное электрическое сопротивление фантома. Полость фантома заполнялась послойно для имитации анатомических структур: кожи (удельная проводимость $0,5 \pm 0,2$ См/м), костей черепа

($0,32 \pm 0,18$ См/м) и головного мозга ($1,2 \pm 0,2$ См/м). Проводимость биологических тканей выбрана из таблиц [12]. Очаги геморрагического поражения имитировались путем инъекции раствора NaCl с концентрацией до 2 %,

ишемические очаги моделировались с помощью дистиллированной воды с удельной проводимостью не более 5 мкСм/м.

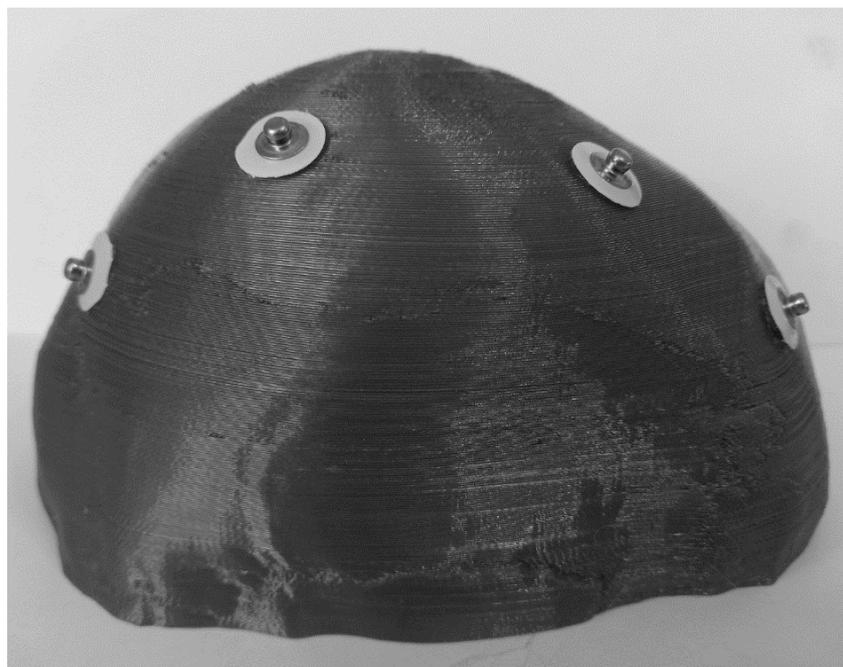


Рис. 1. Анатомически достоверный фантом, использованный для проведения электроимпедансных измерений

Fig. 1. Anatomically realistic phantom to measure electrical impedance

Исследования электрического импеданса проводились на лабораторной установке для широкополосных измерений [12; 13; 14]. Величина зондирующего тока была выбрана равной 1 мА, диапазон частот от 10 кГц до 1 МГц. Базовая погрешность измерения импеданса не превышала 1 %.

Калибровка фантома осуществлялась при заполнении полости раствором NaCl концентрацией 0,9 %.

Обработка результатов измерений и построение графиков осуществлялись в среде статистических вычислений R.

Результаты и их обсуждение

Нормированное значение модуля импеданса, полученное при калибровке фантома, приведено ниже (рис. 2). Погрешность измерений составила около 0,5 %, что обусловлено влиянием контактного сопротивления электродов.

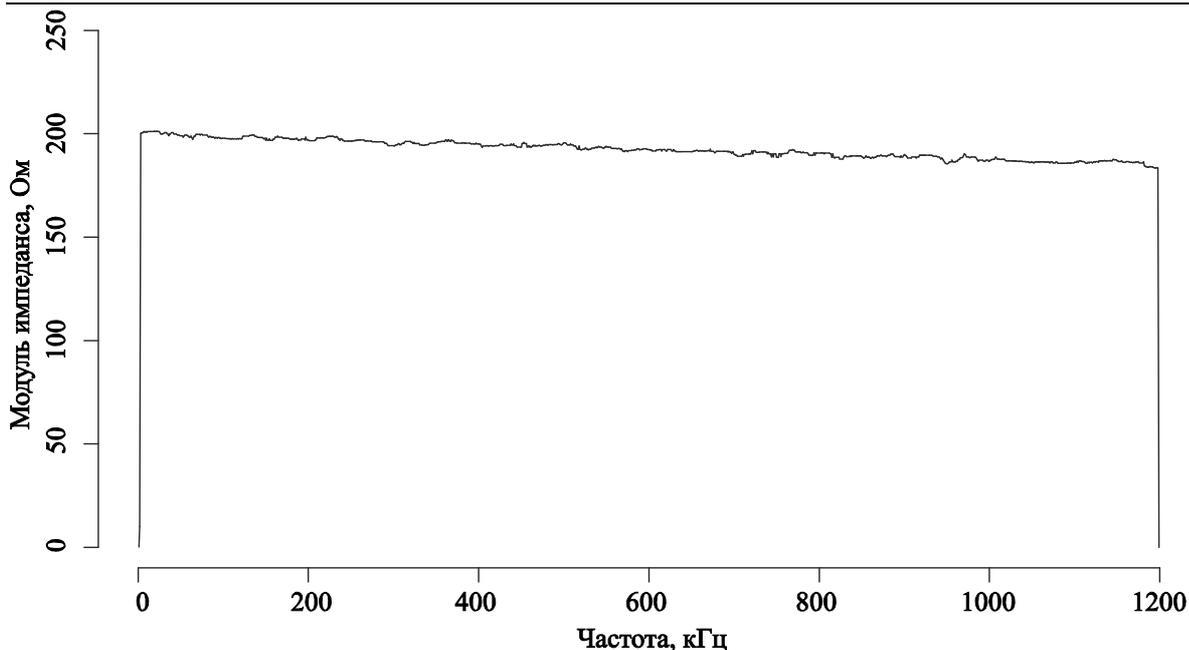


Рис. 2. Зависимость модуля электрического импеданса от частоты при заполнении 0,9% раствором NaCl

Fig. 2. Module of electrical impedance depending on frequency for the phantom filled with 0,9 % NaCl solution

Рассмотрим электроимпедансный спектр фантома, заполненного желатином (рис. 3). Полученный спектр хорошо

согласуется с ранее опубликованными данными [15] в диапазоне частот от 100 кГц до 1 МГц.

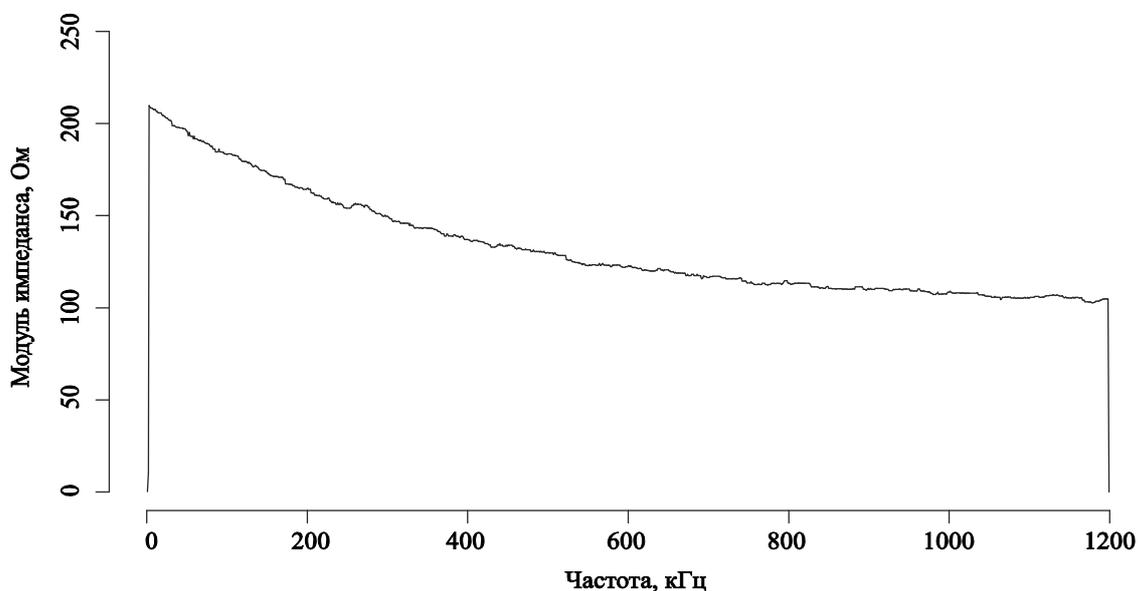


Рис. 3. Зависимость модуля электрического импеданса от частоты для фантома с однородным заполнением желатином

Fig. 3. Module of electrical impedance depending on frequency for the phantom with homogeneous gelatin filling

При моделировании ишемического очага поражения производилась инъекция 5 мл дистиллированной воды последовательно в трех точках на расстоянии 50, 30 и 10 мм от поверхности фантома. Моделирование геморрагического очага поражения осуществлялось путем инъекция 5 мл 2 % раствора NaCl последовательно в трех точках на расстоянии 50, 30 и 10 мм от поверхности фантома. Соответствующие графики приведены в

таблице. Различие ε между спектрами вычислялось как нормированное евклидово расстояние:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{(S_{bg}-S)^2}{\|S_{bg}\|^2}},$$

где S_{bg} – исходный электроимпедансный спектр фантома; S – спектр фантома с модельными включениями.

Пример изменения электроимпедансного спектра приведен ниже (рис. 4).

Таблица. Изменение электроимпедансного спектра по отношению к исходным значениям при различной глубине локализации очага

Table. The changes in electrical impedance spectrum depending on the depth of the loci

Расстояние от поверхности до очага, мм	ε (модель ишемического очага)	ε (модель геморрагического очага)
10	0,05±0,01	0,05±0,01
30	0,03±0,01	0,03±0,01
50	0,02±0,01	<0,01

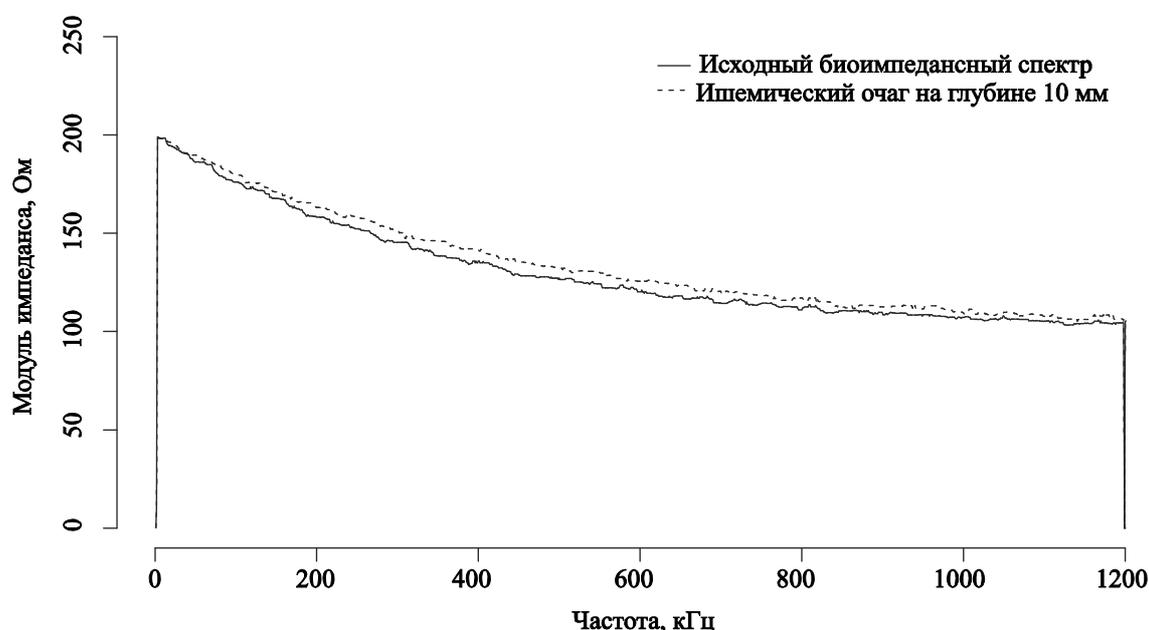


Рис. 4. Изменение модуля электрического импеданса при моделировании очага ишемического поражения

Fig. 4. Variation of electrical impedance spectrum when modelling the ischemic locus

При моделировании очага ишемического поражения было установлено, что происходит увеличение модуля электрического импеданса во всем диапазоне частот. При объеме ишемического очага, соответствующего 5 мл вещества мозга и находящегося на расстоянии 10 мм от ближайшего электрода, величина различий составляет не более 5 % от максимального значения модуля импеданса. При расстоянии 30 и 50 мм при том же объеме очага вариации модуля импеданса составили 3 и 2 % соответственно.

При моделировании геморрагического очага было установлено, что в отличие от модели ишемического очага происходит снижение модуля импеданса преимущественно в низкочастотной области спектра до 200 кГц.

Как и в случае модели ишемического очага, при расстоянии от очага до ближайшего электрода 10 мм величина различий составляет не более 5 % от максимального значения модуля импеданса. При расстоянии 30 и 50 мм при том же объеме очага вариации модуля импеданса составили 3 и менее 1 % соответственно.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что обнаружение очагов кровоизлияния в головном мозге с помощью электроимпедансных измерений требует высокой разрешающей способности и широкого динамического диапазона измерительной аппаратуры.

Полученные данные в определенной степени соотносятся с результатами электроимпедансных измерений при моделировании инсульта на биологических моделях, однако проведены в расширенном диапазоне частот по сравнению с ранее опубликованными измерениями на фантомах. В работе [16] было показано, что современные методы машинного обучения способны определять тип нарушения мозгового кровообращения на основе данных электроимпедансных измерений при отношении сигнал/шум не менее 40 Дб, при объеме очага не менее 30 мл. Однако для раннего обнаружения сосудистого повреждения головного мозга этот объем слишком велик. При меньших размерах зоны повреждения чувствительность метода значительно снижается.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что чувствительность и специфичность электроимпедансного метода классификации типа нарушения мозгового кровообращения в значительной степени определяются разрешающей способностью и динамическим диапазоном используемой аппаратуры. Особую роль играют погрешности измерений на частотах выше 100 кГц, что согласуется с данными исследований [17; 18]. В определенной степени ошибки измерений можно компенсировать [19; 20; 21], однако наши исследования показывают, что нижний предел регистрации изменений значений импеданса при наличии очага кровоизлияния

определяется преимущественно патофизиологическими факторами.

Выводы

Проведенные модельные исследования возможности широкополосной электроимпедансной спектроскопии показывают, что существует принципиальная возможность различения этим методом очагов двух разных типов, находящихся на расстоянии до 50 мм от ближайшего электрода. Однако величина изменений импедансного спектра незначительна и не превышает 5 % от максимального значения модуля импеданса на низких частотах. Можно предположить, что кро-

воизлияния будут проявляться изменениями в низкочастотной части электроимпедансного спектра, в то время как ишемические очаги приведут к увеличению модуля импеданса во всем диапазоне частот.

Можно предположить, что на современном уровне развития технологии широкополосной регистрации электрического импеданса тканей головы минимальный объем очага сосудистого повреждения головного мозга, обнаруживаемый с помощью электроимпедансных измерений на поверхности головы, составляет не менее 5 мл при расположении очага вблизи электродов, увеличиваясь по мере увеличения глубины.

Список литературы

1. Stroke: a global response is needed / W. Johnson, O. Onuma, M. Owolabi, S. Sachdev // *Bulletin of the World Health Organization*. 2016. Vol. 94. P. 634-634A.
2. Multi-frequency electrical impedance tomography and neuroimaging data in stroke patients / N. Goren, J. Avery, T. Dowrick [et al.] // *Scientific Data*. 2018. Vol. 5. P. 180112. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.112>.
3. Dowrick T., Blochet C., Holder D. In vivo bioimpedance measurement of healthy and ischaemic rat brain: implications for stroke imaging using electrical impedance tomography // *Measurements*. 2015. Vol. 36. P. 1273–1282. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/36/6/1273>.
4. Use of an Interactive Method for Classification in Problems of Medical Diagnosis / N. A. Korenevskiy, S. V. Degtyarev, S. P. Seregin, A. V. Novikov // *Biomedical Engineering*. 2013. Vol. 47, is. 4. P. 169-172. <https://doi.org/10.1007/s10527-013-9361-6>.
5. An expert system for assessment of the state of cognitive functions using a fuzzy hybrid knowledge base / N. A. Korenevskiy, S. N. Rodionova, N. L. Korzhuk [et al.] // *Biomedical Engineering*. 2021. Vol. 55. P. 263–268. <https://doi.org/10.1007/s10527-021-10115-w>.
6. Developing a biotech scheme using fuzzy logic model to predict occurrence of diseases using person's functional state / R. T. A. Kasasbeh, N. A. Korenevskiy, A. A. Aikeyeva [et al.] // *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2020. Vol. 62, N 3. P. 257-267.

7. Fan Y., Ying L. Solving electrical impedance tomography with deep learning // *Journal of Computational Physics*. 2020. Vol. 404. P. 109119. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.109119>.

8. Candiani V., Santacesaria M. Neural networks for classification of strokes in electrical impedance tomography on a 3D head model // *Mathematics in Engineering*. 2022. Vol. 4, N 4. P. 1-22. <https://doi.org/10.3934/mine.2022029>.

9. Residual convolutional neural network-based stroke classification with electrical impedance tomography / Y. Shi, Z. Tian, M. Wang [et al.] // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2022. Vol. 71. P. 1-11. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3165786>.

10. A versatile and reproducible multi-frequency electrical impedance tomography system / J. Avery, T. Dowrick, M. Faulkner, N. Goren, D. Holder // *Sensors*. 2017. Vol. 17. P. 280. <https://doi.org/10.3390/s17020280>.

11. In vivo bioimpedance spectroscopy characterization of healthy, hemorrhagic and ischemic rabbit brain within 10 Hz-1 MHz / L. Yang, W. Liu, R. Chen, G. Zhang, W. Li, F. Fu, X. Dong // *Sensors*. 2017. Vol. 17, N 4. P. 791. <https://doi.org/10.3390/s17040791>.

12. IT'IS database for thermal and electromagnetic parameters of biological tissues, Version 4.0 / P. A. Hasgall, F. Di Gennaro, C. Baumgartner, E. Neufeld [et al.]. URL: <http://www.itis.swiss/database> (дата обращения: 17.02.2022).

13. Pinto A. M. R., Bertemes-Filho P., Paterno A. S. Gelatin as a skin phantom for bioimpedance spectroscopy // *VI Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB 2014*. <https://doi.org/10.13140/2.1.2704.9762>.

14. Brazovskii K. S., Koroluk E. S. A device for measuring electrical parameters of biological tissues during cryodestruction // *Biomedical Engineering*. 2021. Vol. 54, N 6. P. 402-406.

15. Brain haemorrhage detection using a SVM classifier with electrical impedance tomography measurement frames / B. McDermott, M. O'Halloran, E. Porter, A. Santorelli // *PLoS ONE*. 2018. Vol. 13, N 7. P. e0200469. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200469>.

16. Classification of stroke using neural networks in EIT / J. P. Agnelli, A. Çöl, M. Lassas [et al.] // *Inverse Problems*. 2020. Vol. 36, N 11. P. 115008. <https://doi.org/10.1088/1361-6420/abbdcd>.

17. Approach to compensate measurement errors in electrical impedance tomography / T. Menden, J. Orschulik, T. Tholen [et al.] // *IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*. 2017. P. 1-4. <https://doi.org/10.1109/BIOCAS.2017.8325139>.

18. Multiplexing error and noise reduction in electrical impedance tomography imaging / B. Martina, P. Sánchez, V. Julián [et al.] // *Frontiers in Electronics*. 2022. Vol. 3. <https://doi.org/10.3389/felec.2022.848618>.

19. Learning and correcting non-Gaussian model errors / D. Smyl, T. N. Tallman, J. A. Black [et al.] // *Journal of Computational Physics*. 2021. Vol. 432. P. 110152. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2021.110152>.

20. Approximation error method for imaging the human head by electrical impedance tomography / V. Candiani, N. Hyvönen, J. P. Kaipio, V. Kolehmainen // *Inverse Problem*. 2021. Vol. 37, N 12. P. 125008. <https://doi.org/10.1088/1361-6420/ac346a>.

21. Polynomial collocation for handling an inaccurately known measurement configuration in electrical impedance tomography / N. Hyvönen, V. Kaarnioja, L. Mustonen, S. Staboulis // *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 2017. Vol. 77, N 1. P. 202-223. <https://doi.org/10.1137/16M1068888>.

References

1. Johnson W., Onuma O., Owolabi M., Sachdev S. Stroke: a global response is needed. *Bulletin of the World Health Organization*, 2016, vol. 94, pp. 634-634A.

2. Goren N., Avery J., Dowrick T., eds. Multi-frequency electrical impedance tomography and neuroimaging data in stroke patients. *Scientific Data*, 2018, vol. 5, p. 180112. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.112>

3. Dowrick T., Blochet C., Holder D. In vivo bioimpedance measurement of healthy and ischaemic rat brain: implications for stroke imaging using electrical impedance tomography. *Measurements*, 2015, vol. 36, pp. 1273–1282. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/36/6/1273>

4. Korenevskiy N. A., Degtyarev S. V., Seregin S. P., Novikov A. V. Use of an Interactive Method for Classification in Problems of Medical Diagnosis. *Biomedical Engineering*, 2013, vol. 47, is. 4, pp. 169-172. <https://dx.doi.org/10.1007/s10527-013-9361-6>

5. Korenevskiy N. A., Rodionova S. N., Korzhuk N. L., eds. An expert system for assessment of the state of cognitive functions using a fuzzy hybrid knowledge base. *Biomedical Engineering*, 2021, vol. 55, pp. 263–268. <https://doi.org/10.1007/s10527-021-10115-w>

6. Kasasbeh R. T. A., Korenevskiy N. A., Aikeyeva A. A., eds. Developing a biotech scheme using fuzzy logic model to predict occurrence of diseases using person's functional state. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 2020, vol. 62, no. 3, pp. 257-267.

7. Fan Y., Ying L. Solving electrical impedance tomography with deep learning. *Journal of Computational Physics*, 2020, vol. 404, p. 109119. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.109119>

8. Candiani V., Santacesaria M. Neural networks for classification of strokes in electrical impedance tomography on a 3D head model. *Mathematics in Engineering*, 2022, vol. 4, no. 4, pp. 1-22. <https://doi.org/10.3934/mine.2022029>

9. Shi Y., Tian Z., Wang M., eds. Residual convolutional neural network-based stroke classification with electrical impedance tomography. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, vol. 71, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3165786>

10. Avery J., Dowrick T., Faulkner M., Goren N., Holder D. A versatile and reproducible multi-frequency electrical impedance tomography system. *Sensors*, 2017, vol. 17, p. 280. <https://doi.org/10.3390/s17020280>

11. Yang L., Liu W., Chen R., Zhang G., Li W., Fu F., Dong X. In vivo bioimpedance spectroscopy characterization of healthy, hemorrhagic and ischemic rabbit brain within 10 Hz-1 MHz. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 4, p. 791. <https://doi.org/10.3390/s17040791>

12. Hasgall P. A., Di Gennaro F., Baumgartner C., Neufeld E., eds. IT'IS database for thermal and electromagnetic parameters of biological tissues, Version 4.0. Available at: <http://www.itis.swiss/database>. (accessed 17.02.2022)

13. Pinto A. M. R., Bertemes-Filho P., Paterno A. S. Gelatin as a skin phantom for bioimpedance spectroscopy. VI Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB, 2014. <https://doi.org/10.13140/2.1.2704.9762>

14. Brazovskii K. S., Koroluk E. S. A device for measuring electrical parameters of biological tissues during cryodestruction. *Biomedical Engineering*, 2021, vol. 54, no. 6, pp. 402-406.

15. McDermott B., O'Halloran M., Porter E., Santorelli A. Brain haemorrhage detection using a SVM classifier with electrical impedance tomography measurement. *PLoS ONE*, 2018, vol. 13, no. 7, p. e0200469. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200469>

16. Agnelli J. P., Çöl A., Lassas M., eds. Classification of stroke using neural networks in EIT. *Inverse Problems*, 2020, vol. 36, no. 11, p. 115008. <https://doi.org/10.1088/1361-6420/abbdcd>

17. Menden T., Orschulik J., Tholen T., eds. Approach to compensate measurement errors in electrical impedance tomography. IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS), 2017, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/BIOCAS.2017.8325139>

18. Martina B., Sánchez P., Julián V., eds. Multiplexing error and noise reduction in electrical impedance tomography imaging. *Frontiers in Electronics*, 2022, vol. 3. <https://doi.org/10.3389/felec.2022.848618>

19. Smyl D., Tallman T. N., Black J. A., eds. Learning and correcting non-Gaussian model errors. *Journal of Computational Physics*, 2021, vol. 432, p. 110152. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2021.110152>

20. Candiani V., Hyvönen N., Kaipio J. P., Kolehmainen V. Approximation error method for imaging the human head by electrical impedance tomography. *Inverse Problem*, 2021, vol. 37, no. 12, p. 125008. <https://doi.org/10.1088/1361-6420/ac346a>

21. Hyvönen N., Kaarnioja V., Mustonen L., Staboulis S. Polynomial collocation for handling an inaccurately known measurement configuration in electrical impedance tomography. *SIAM. Journal on Applied Mathematics*, 2017, vol. 77, no. 1, pp. 202-223. <https://doi.org/10.1137/16M1068888>

Информация об авторах / Information about the Authors

Бразовский Константин Станиславович, доктор технических наук, профессор исследовательской школы химических и биомедицинских технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация, e-mail: mbc@tpu.ru, ORCID 0000-0002-4779-9820, ResearchID O-4043-2016

Konstantin S. Brazovskii, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Research School for Chemical and Applied Biomedical Science, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation, e-mail: mbc@tpu.ru, ORCID 0000-0002-4779-9820, ResearchID O-4043-2016

Винокурова Дарья Александровна, ассистент кафедры факультетской терапии с курсом клинической фармакологии, Сибирский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Томск, Российская Федерация, e-mail: kaf.fak.ter@ssmu.ru, ORCID 0000-0002-8422-8349

Daria A. Vinokurova, Assistant of the Department of Therapy and Clinical Pharmacology, Siberian State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Tomsk, Russian Federation, e-mail: kaf.fak.ter@ssmu.ru, ORCID 0000-0002-8422-8349

Королюк Евгений Сергеевич, аспирант исследовательской школы химических и биомедицинских технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация, e-mail: esk13@tpu.ru

Evgenii S. Koroluk, Post-Graduate Student of the Research School for Chemical and Applied Biomedical Science, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation, e-mail: esk13@tpu.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-135-148>

Прогнозирование степени тяжести ишемии поражённого органа на основании обменных нарушений

С. В. Корогодина¹, А. В. Полякова¹, П. С. Азарова¹, А. В. Винников¹,
А. В. Быков¹, Е. В. Цымбал², Н. А. Кореневский¹ ✉

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

² 3 Центральный военный клинический госпиталь им. А. А. Вишневого Минобороны России
ул. Светлая 11, г. Красногорск 143409, Московская область, Российская Федерация

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Резюме

Целью исследования является повышение качества прогнозирования степени тяжести ишемии поражённого органа путем разработки нечетких математических моделей, в качестве предикторов которых используется описание процессов обменных нарушений.

Методы. В ходе разведочного анализа было установлено, что прогнозируемые классы состояний имеют нечеткую структуру с пересекающимися границами классов. С учетом этого в качестве базового математического аппарата использовалась методология синтеза гибридных нечетких решающих правил, хорошо зарекомендовавшая себя при решении задач с аналогичной структурой данных.

Результаты. При проведении исследований были синтезированы математические модели прогнозирования степени тяжести ишемических нарушений и получены соответствующие функции принадлежности для оценки степени тяжести ишемии поражённого органа для каждого из признаков. Экспертное оценивание и математическое моделирование показали, что уверенность в правильном принятии решений по прогнозу тяжести ишемии поражённого органа превышает величину 0,9.

Заключение. Разработанный алгоритм позволил в 90% случаев избежать развития сердечно-сосудистых осложнений в виде инфаркта миокарда, острого нарушения мозгового кровообращения и гангрены нижних конечностей, что позволяет рекомендовать его применение в клинической практике кардиологов и сердечно-сосудистых хирургов.

Ключевые слова: ишемия; обменные нарушения; прогнозирование; математическая модель; нечеткая логика принятия решений.

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

Для цитирования: Прогнозирование тяжести ишемии поражённого органа на основании обменных нарушений / С. В. Корогодина, А. В. Полякова, П. С. Азарова, А. В. Винников, А. В. Быков, Е. В. Цымбал, Н. А. Кореневский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 2 С. 145–159. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-135-148>.

Поступила в редакцию 28.03.2022

Подписана в печать 25.04.2022

Опубликована 27.06.2022

© Корогодина С. В., Полякова А. В., Азарова П. С., Винников А. В., Быков А. В.,
Цымбал Е. В., Кореневский Н. А., 2022

Prediction of the Severity of Ischemia of the Affected Organ on the Basis of Metabolic Disorders

Sofya V. Korogodina¹, Angelina V. Polyakova¹, Polina S. Azarova¹,
Artem V. Vinnikov¹, Alexdander V. Bykov¹, Evgeny V. Tsymbal²,
Nikolay A. Korenevsky¹ ✉

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

² 3 A. A. Vishnevsky Central Military Clinical Hospital of the Russian Ministry of Defense
11 Svetlyaya Str., Krasnogorsk 143409, Moscow Region, Russian Federation

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Abstract

The purpose of research is to develop a method that allows predicting the severity of ischemia of the affected organ on the basis of metabolic disorders (PION) based on the use of such indicators as: base deficiency (DO), blood glucose (GC), potassium (K), sodium (Na), blood bicarbonate (BCC), partial CO₂ voltage (PNUG), blood pH, aldosterone.

Methods. In the course of the work, an exploratory analysis was carried out using the method of group accounting of arguments (MGUA) and the theory of latent variables with the Rush model was used. As a basic mathematical apparatus, the methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules was used, which proved itself well when solving problems with a fuzzy description of the classes under study.

Results. During the research, mathematical models for predicting the severity of ischemic disorders were synthesized and appropriate membership functions were obtained to assess the severity of ischemia of the affected organ for each of the signs. Expert evaluation and mathematical modeling have shown that confidence in the correct decision-making on the prognosis of the severity of ischemia of the affected organ exceeds 0.9.

Conclusion. The developed algorithm made it possible in 90% of cases to avoid the development of cardiovascular complications in the form of myocardial infarction, acute cerebrovascular accident and gangrene of the lower extremities, which makes it possible to recommend its use in clinical practice of cardiologists and cardiovascular surgeons.

Keywords: ischemia; metabolic disorders; forecasting; mathematical model; fuzzy logic of decision-making.

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

For citation: Korogodina S.V., Polyakova A.V., Azarova P.S., Vinnikov A.V., Bykov A.V., Tsymbal E.V., Korenevskiy N. A. Prediction of the Severity of Ischemia of the Affected Organ Based on Metabolic Disorders. *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.* 2022; 12(2): 135–148. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-135-148>.

Received 28.03.2022

Accepted 25.04.2022

Published 27.06.2022

Введение

Основными причинами ишемического поражения органов являются атеросклероз и осложнённый сахарный

диабет. При недостатке O₂ для поддержания энергетического баланса активно развивается гликолиз с образованием в большом количестве молочной кислоты, которая определяется в организме как

лактат [1; 2]. Последний активно влияет на кислотно-основное состояние крови (КОС), смещая показатель рН в сторону его уменьшения. Нижней границей нормы рН является 7,35. Увеличение лактата приводит в первую очередь к росту дефицита оснований (норма – 9-13 мэкв/л) и ацидемии. При этом нормальном буферном влиянии рН может длительное время не изменяться. При этом организм отвечает рядом защитных реакций, чтобы сохранить рН в нормальном диапазоне. Во-первых, происходит активизация дыхания и это отражается в виде снижения PaCO_2 (критическое снижение – до 10 мм рт. ст.) и концентрации HCO_3^- . Кроме того, меняется состояние электролитов крови. Как защитная реакция происходит трансмембранный антипорт протонов водорода на калий в направлении клеток, формируется гиперкалиемия, которая прогрессирует при нарушении толерантности к глюкозе (НТГ) и при наличии сахарного диабета (СД) в условиях дефицита инсулина. Гиперкалиемия провоцирует смещение рН ниже 7,35 с формированием метаболического ацидоза, что в свою очередь приводит к вторичному повышению глюкозы крови. Это состояние влияет на усиление осмодиуреза и задержки натрия. На фоне снижения альдостерона и повышения вазопрессина происходит массивная потеря калия с его выходом из клеток. Формируется состояние локального повышения калия с

повышением потенциала покоя клеток и системной гипокалиемии с высоким риском опасной для жизни аритмии с остановкой сердца. Локально возможно развитие некромиолиза с прогрессирующим выходом и потерей калия. Вторичный почечный и дыхательный алкалоз как защитная реакция ещё более обедняет организм калием. Поэтому, анализируя обменные нарушения, можно своевременно прогнозировать тяжёлые ишемические поражения жизненно важных органов (сердца, головного мозга и нижних конечностей).

Материалы и методы

В рандомизированном клиническом исследовании (РКИ) приняли участие 78 человек. Пациенты рандомизированы по возрасту, полу, по наличию распространённого атеросклероза, сахарного диабета, сердечной недостаточности. С учетом данных разведочного анализа в качестве базового математического аппарата была выбрана методология синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), описанная в работах кафедры биомедицинской инженерии Юго-Западного государственного университета [3; 4; 5; 6; 7; 8]. Эффективность использования этой методологии для решения задач оценки степени ишемического поражения различных органов и систем была показана в работах [8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22].

В рамках этой методологии был проведён разведочный анализ, в ходе которого были отобраны следующие информативные признаки: X_1 – содержание калия в крови; X_2 – содержание альдостерона; X_3 – уровень дефицита оснований; X_4 – уровень бикарбоната крови; X_5 – уровень глюкозы крови; X_6 – уровень парциального напряжения CO_2 ; X_7 – pH крови; X_8 – содержание натрия в крови. На втором этапе исследований с участием экспертов, подготовленных в области синтеза гибридных нечетких решающих правил, были построены функции принадлежности к лингвистической переменной «степень уверенности в развитии ишемии» исследуемого органа – $\mu(X_i)$.

Эта функция отражает влияние каждого из признаков на оценку уверенно-

сти возникновения ишемии пораженного органа, причем увеличение функции $\mu(X_i)$ соответствует увеличению уверенности в том, что у пациента развивается ишемия пораженного органа, что позволяет для расчета показателя, характеризующего интегральную уверенность в риске появления ишемии UF , выбрать модифицированную формулу Е. Шортлифа [4; 5; 6; 7].

Результаты и их обсуждение

Искомые функции принадлежности к лингвистической переменной «степень уверенности в развитии ишемии» $\mu(X_i)$ специально подготовленная группа экспертов строила с использованием метода Дельфи. Примеры графиков полученных функций принадлежности приведены ниже (рис. 1-3).

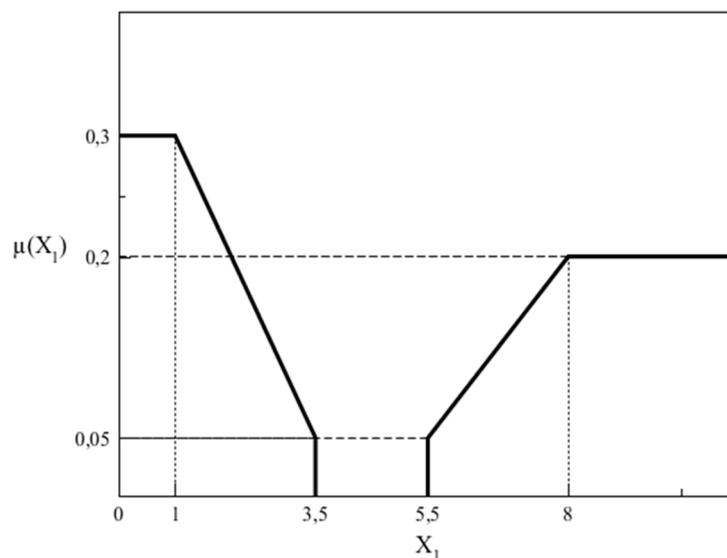


Рис. 1. График функции принадлежности $\mu(X_1)$

Fig. 1. Graph of the membership function $\mu(X_1)$

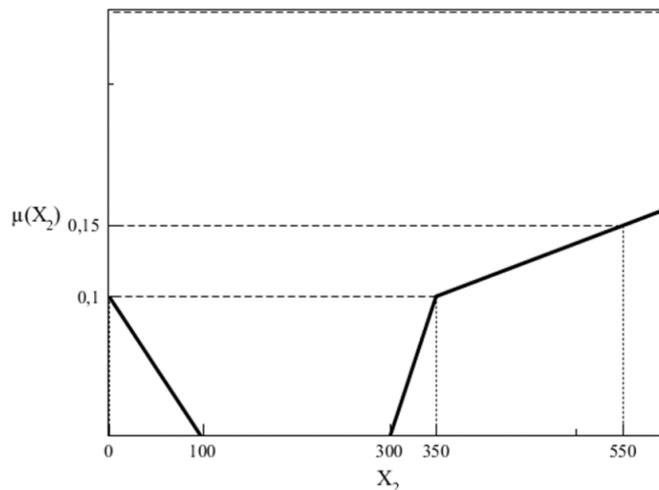


Рис. 2. График функции принадлежности $\mu(X_2)$

Fig. 2. Graph of the membership function $\mu(X_2)$

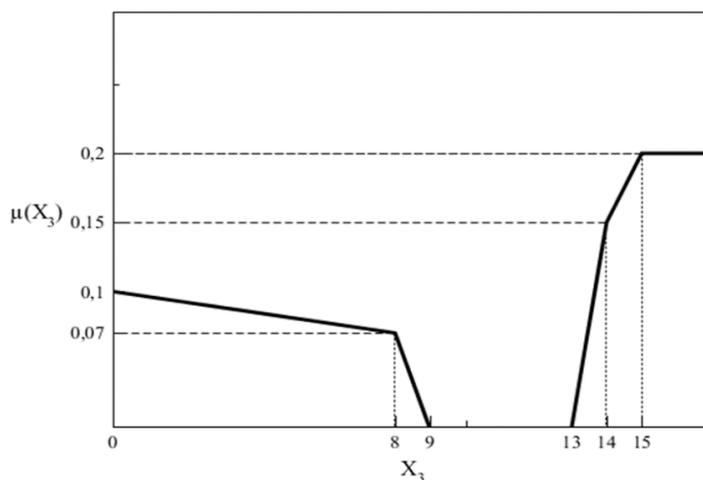


Рис. 3. График функции принадлежности $\mu(X_3)$

Fig. 3. Graph of the membership function $\mu(X_3)$

Аналитически данные графики функций принадлежности описываются следующими выражениями:

$$\mu(X_1) = \begin{cases} 0,3, & \text{если } X_1 < 1, \\ -0,1X_1 + 0,4, & \text{если } 1 \leq X_1 < 3,5, \\ 0, & \text{если } 3,5 \leq X_1 < 5,5, \\ 0,06X_1 - 0,28, & \text{если } 5,5 \leq X_1 < 8, \\ 0,2, & \text{если } X_1 \geq 8; \end{cases}$$

$$\mu(X_2) = \begin{cases} -0,001X_2 + 0,1, & \text{если } X_2 < 100, \\ 0, & \text{если } 100 \leq X_2 < 300, \\ 0,001X_2 - 0,3, & \text{если } 300 \leq X_2 < 350, \\ 0,0005X_2 - 0,125, & \text{если } 350 \leq X_2 < 550; \end{cases}$$

$$\mu(X_3) = \begin{cases} -0,00375X_3 + 0,1, & \text{если } X_3 < 8, \\ -0,07X_3 + 0,63, & \text{если } 8 \leq X_3 < 9, \\ 0, & \text{если } 9 \leq X_3 < 13, \\ 0,15X_3 - 1,95, & \text{если } 13 \leq X_3 < 14, \\ 0,05X_3 - 0,55, & \text{если } 14 \leq X_3 < 15, \\ 0,2, & \text{если } X_3 \geq 15. \end{cases}$$

Интегральная оценка уверенности в появлении и развитии ишемического поражения исследуемого органа определяется выражением

$$\begin{aligned} UF(q+1) &= \\ &= UF(q) + \mu(X_{i+1})[1 - UF(q)] \end{aligned} \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, 8$; $UF(1) = \mu(X_1)$.

Анализ свойств полученной формулы позволил сделать вывод о том, что

численное значение UF может быть использовано для оценки степени тяжести прогнозируемого ишемического поражения. В связи с этим на экспертном уровне было предложено 4 класса прогнозируемой степени тяжести ишемии пораженного органа (I – отсутствие риска ишемического поражения; II – латентное состояние; III – реверсивное состояние; IV – критическое состояние). Используя показатель UF как базовую переменную, были получены графики функций принадлежности $\mu_r(UF)$ к выбранным классам степени тяжести (рис. 4).

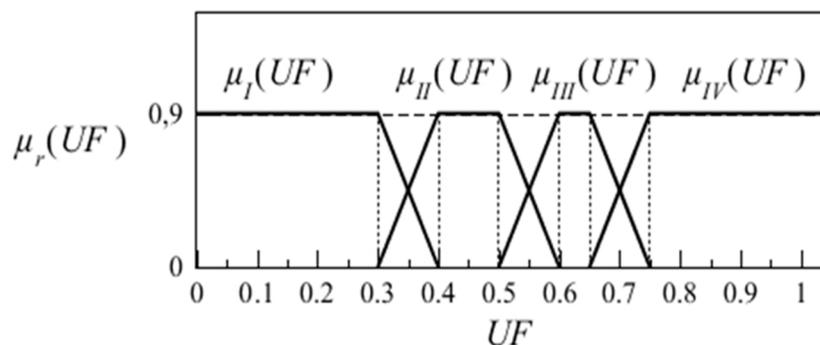


Рис. 4. Графики функций принадлежности, классифицирующих степени тяжести ишемии поражённого органа

Fig. 4. Graphs of accessory functions classifying the severity of ischemia of the affected organ

Аналитические выражения функций принадлежности $\mu_r(UF)$ имеют следующий вид:

$$\mu_1(UF) = \begin{cases} 0,9, & \text{если } UF < 0,3, \\ -9UF + 3,6, & \text{если } 0,3 \leq UF < 0,4, \\ 0, & \text{если } UF \geq 0,4; \end{cases}$$

$$\mu_2(UF) = \begin{cases} 0, & \text{если } UF < 0,3, \\ 9UF - 2,7, & \text{если } 0,3 \leq UF < 0,4, \\ 0,9, & \text{если } 0,4 \leq UF < 0,5, \\ -9UF + 5,4, & \text{если } 0,5 \leq UF < 0,6, \\ 0, & \text{если } UF \geq 0,6; \end{cases}$$

$$\mu_{III}(UF) = \begin{cases} 0, & \text{если } UF < 0,5, \\ 9UF - 4,5, & \text{если } 0,5 \leq UF < 0,6, \\ 0,9, & \text{если } 0,6 \leq UF < 0,65, \\ -9UF + 6,75, & \text{если } 0,65 \leq UF < 0,75, \\ 0, & \text{если } UF \geq 0,75; \end{cases}$$

$$\mu_{IV}(UF) = \begin{cases} 0, & \text{если } UF < 0,65, \\ 9UF - 5,85, & \text{если } 0,65 \leq UF < 0,75, \\ 0,9, & \text{если } UF \geq 0,75. \end{cases}$$

Решение о принадлежности к тому или иному классу UST принимается по величине максимального значения функции $\mu_r(UF)$:

$$UST = \max[\mu_I(UF), \mu_{II}(UF), \mu_{III}(UF), \mu_{IV}(UF)]. \quad (2)$$

В ходе экспертного оценивания и математического моделирования было показано, что уверенность в правильном принятии решений по прогнозу тяжести ишемии поражённого органа превышает величину 0,9.

Выводы

Составленный алгоритм с достоверностью 0,9 позволяет прогнозировать степень тяжести ишемии поражённого органа на основании обменных нарушений. Таким образом, предложенный способ на основе критерия ПИОН позволил в 90% случаев в период наблюдения (1 год) избежать тяжёлых осложнений в виде инфаркта миокарда, острого нарушения мозгового кровообращения и гангрены нижних конечностей. По стандартным прогностическим шкалам было определено около 50-60% случаев, что свидетельствует о более высокой эффективности предлагаемого в данном исследовании способа и позволяет рекомендовать его применение в клинической практике кардиологов и сердечно-сосудистых хирургов.

Список литературы

1. Скворцов В. В., Скворцова Е. М., Бангаров Р. Ю. Лактат-ацидоз в практике врача – анестезиолога-реаниматолога // Вестник анестезиологии и реаниматологии. 2020. № 3. С. 95-100.
2. Бородина Л. В. Ишемическая болезнь почек // Вестник молодого ученого. 2017. № 1. С. 36-41.
3. Корневский Н. А., Шуткин А. Н., Бойцова Е. А. Оценка и управление состоянием здоровья на основе моделей Г. Раша // Медицинская техника. 2015. № 6. С. 37-40.
4. 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.

5. Корневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1. С. 33-35.

6. Корневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.

7. Метод синтеза нечетких решающих правил на основе моделей системных взаимосвязей для решения задач прогнозирования и диагностики заболеваний / Н. А. Корневский, М. В. Артеменко, В. Я. Провоторов, Л. А. Новикова // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2014. Т. 13, № 4. С. 881-886.

8. Бокерия Л. А., Быков А. В., Корневский Н. А. Оптимизация ведения пациентов с мультицентричным ишемическим поражением на базе нечетких интеллектуальных технологий: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 400 с.

9. Быков А. В. Метод и нечеткая модель оценки степени тяжести ишемической болезни центральной гемодинамической системы // Вестник новых медицинских технологий. 2017. Т. 24, № 4. С. 144-150.

10. Быков А. В. Метод оценки вариабельности показателей, характеризующих кровоснабжение стопы у больных с ишемической болезнью нижних конечностей // Современное научное знание: теория методология, практика: сборник материалов научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. Смоленск: НОВАЛЕНСО, 2016. Ч. 1. С. 26-29.

11. Быков А. В. Прогнозирование возникновения и развития гангрены нижних конечностей на основе нечетких моделей принятия решений // Известия Юго-Западного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2017. № 4 (25). С. 95-103.

12. Быков А. В., Бойцов А. В., Родионов Д. С. Способ определения интенсивности болевого синдрома при ишемии головного мозга // Известия Юго-Западного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2017. Т. 7, № 3 (24). С. 91-100.

13. Интеллектуальная поддержка принятия решений при ведении пациентов с ишемией нижних конечностей на основе гибридных нечетких моделей / А. В. Быков, А. А. Бурмака, С. Н. Корневская, Д. С. Родионов // Медицинская техника. 2018. № 4 (310). С. 39-41.

14. Прогнозирование развития критического состояния кровообращения сердца на основе гибридных нечетких моделей / А. В. Быков, С. Н. Корневская, И. А. Комлев, Д. С. Родионов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8, № 1 (26). С. 74-87.

15. Интеллектуальная поддержка ведения больных с системными ишемическими поражениями / А. В. Быков, С. Н. Корневская, С. А. Пархоменко, Д. С. Родионов // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: труды XIII Международной научной конференции с научной молодежной школой имени И. Н. Спиридонова: 2 кн. М.: Графика, 2018. С. 334-336.

16. Быков А. В., Корневская С. Н., Пархоменко С. А. Система поддержки принятия решений для ведения больных с хроническим облитерирующим заболеванием артерий нижних конечностей, отягощенных ишемической патологией // Медико-экологические информационные технологии – 2018: сборник научных статей по материалам XXI Международной научно-технической конференции / отв. ред. Н. А. Корневский; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2018. С. 69-77.

17. Прогнозирование появления и развития гангрены нижних конечностей с использованием нечетких интеллектуальных технологий: монография / А. В. Быков, С. Н. Корневская, С. А. Пархоменко, Л. В. Стародубцева, И. И. Хрипина. Курск: Издательский дом ВИП, 2017. 470 с.

18. Быков А. В., Корневская С. Н., Родионов Д. С. Использование гибридных нечетких моделей для оценки степени тяжести сочетанных ишемических патологий // Биотехнические, медицинские, экологические системы и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2017: сборник трудов XXX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов / Рязанский государственный радиотехнический университет. Рязань, 2017. С. 297-300.

19. Оценка интенсивности болевого синдрома при ишемии сердца / А. В. Быков, Н. А. Корневский, Е. А. Бойцова, Р. Ю. Горайнов // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2017. Т. 16, № 4. С. 848-856.

20. Метод и нечеткая модель оценки динамики развития критической ишемии нижних конечностей / А. В. Быков, Н. А. Корневский, С. Н. Родионова, Е. В. Цымбал // Вестник новых медицинских технологий. 2018. Т. 25, № 4. С. 251-257.

21. Выбор схем лечебно-оздоровительных мероприятий для больных хроническими облитерирующими заболеваниями артерий нижних конечностей с учетом системных взаимосвязей центральной и региональной гемодинамики / А. В. Быков, Н. А. Корневский, С. А. Пархоменко, С. Н. Родионова, Е. В. Цымбал // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2018. № 6. С. 105-114.

22. Пат. 2691932 Российская Федерация, МПК А61В5/02 G06F17/00 G01N33/48. Способ прогнозирования степени тяжести ишемического процесса сердца, головного мозга и нижних конечностей на основании оценки центральной и регионарной гемодинамики органов / Быков А. В., Корневский Н. А. Заявл. 18.05.17; опубл. 18.06.17, Бюл. № 17.

References

1. Skvorcov V. V., Skvorcova E. M., Bangarov R. Ju. Laktat-acidoz v praktike vracha – anesteziologa-reanimatologa [Lactate acidosis in the practice of an anesthesiologist-resuscitator]. *Vestnik anesteziologii i reanimatologii = Bulletin of Anesthesiology and Resuscitation*, 2020, no. 3, pp. 95-100.
2. Borodina L. V. Ishemicheskaja bolezn' pochek [Ischemic kidney disease]. *Vestnik mladogo uchenogo = Bulletin of the Young Scientist*, 2017, no. 1, pp. 36-41.
3. Korenevskij N. A., Shutkin A. N., Bojcovaja E. A. Ocenka i upravlenie sostojaniem zdorov'ja na osnove modelej G. Rasha [Assessment and management of health status based on G. Rush models]. *Medicinskaja tehnika = Medical Equipment*, 2015, no. 6, pp. 37-40.
4. Korenevskij N. A. Proektirovanie nechetkih reshajushhih setej, nastraivaemyh po strukture dannyh dlja zadach medicinskoj diagnostiki [Design of fuzzy decision networks configurable by data structure for medical diagnostics tasks]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2005, vol. 4, no. 1, pp. 12-20.
5. Korenevskij N. A. Ispol'zovanie nechetkoj logiki prinjatija reshenij dlja medicinskih jekspertnyh system [Using fuzzy logic of decision-making for medical expert systems]. *Medicinskaja tehnika = Medical Equipment*, 2015, no. 1, pp. 33-35.
6. Korenevskij N. A., Rodionova S. N., Hripina I. I. Metodologija sinteza gibridnyh nechetkih reshajushhih pravil dlja medicinskih intellektual'nyh sistem podderzhki prinjatija reshenij [Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems]. Staryj Oskol, TNT Publ., 2019. 472 p.
7. Korenevskij N. A., Artemenko M. V., Provotorov V. Ja., Novikova L. A. Metod sinteza nechetkih reshajushhih pravil na osnove modelej sistemnyh vzaimosvjazej dlja reshenija zadach prognozirovanija i diagnostiki zabojevanij [The method of synthesis of fuzzy decision rules based on models of system relationships for solving problems of forecasting and diagnosis of diseases]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2014, vol. 13, no. 4, pp. 881-886.
8. Bokeriya L. A., Bykov A. V., Korenevskij N. A. Optimizaciya vedeniya pacientov s mul'ticentrichnym ishemicheskim porazheniem na baze nechetkih intellektual'nyh tekhnologij [Optimization of management of patients with multicentric ischemic lesion based on fuzzy intelligent technologies]. Staryj Oskol, TNT Publ., 2019. 400 p.
9. Bykov A. V. Metod i nechetkaya model' ocenki stepeni tyazhesti ishemicheskoj boleznj central'noj gemodinamicheskoj sistemy [Method and fuzzy model for assessing the severity of

ischemic disease of the central hemodynamic system]. *Vestnik novyh medicinskih tekhnologij = Bulletin of New Medical Technologies*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 144-150.

10. Bykov A. V. [Method for assessing the variability of indicators characterizing the blood supply of the foot in patients with ischemic disease of the lower extremities]. *Sovremennoe nauchnoe znanie: teoriya metodologiya, praktika. Sbornik materialov nauchnyh trudov po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Modern scientific knowledge: theory, methodology, practice. Collection of materials of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference]*. Smolensk, NOVALENKO Publ., 2016, pt. 1, pp. 26-29. (In Russ.)

11. Bykov A. V. Prognozirovanie vozniknoveniya i razvitiya gangreny nizhnih konechnostej na osnove nechetkih modelej prinyatiya reshenij [Forecasting the occurrence and development of gangrene of the lower extremities based on fuzzy decision-making models]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo universiteta. Seriya Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation*, 2017, no. 4 (25), pp. 95-103.

12. Bykov A. V., Bojcov A. V., Rodionov D. S. Sposob opredeleniya inetensivnosti bolevogo sindroma pri ishemii golovnogo mozga [A method for determining the inetensiveness of pain syndrome in cerebral ischemia]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo universiteta. Seriya Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation*, 2017, vol. 7, no. 3 (24), pp. 91-100.

13. Bykov A. V., Burmaka A. A., Korenevskaya S. N., Rodionov D. S. Intellektual'naya podderzhka prinyatiya reshenij pri vedenii pacientov s ishemiej nizhnih konechnostej na osnove gibridnyh nechetkih modelej [Intellectual decision support in the management of patients with lower limb ischemia based on hybrid fuzzy models]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2018, vol. 4 (310), pp. 39-41.

14. Bykov A. V., Korenevskaya S. N., Komlev I. A., Rodionov D. S. Prognozirovanie razvitiya kriticheskogo sostoyaniya krovoobrashcheniya serdca na osnove gibridnyh nechetkih modelej [Forecasting the development of a critical state of the circulation of the heart based on hybrid fuzzy models]. *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*, 2018, vol. 8, no. 1 (26), pp. 74-87.

15. Bykov A. V., Korenevskaya S. N., Parhomenko S. A., Rodionov D. S. [Intellectual support for the management of patients with systemic ischemic lesions]. *Fizika i radioelektronika v medicine i ekologii. Trudy XIII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii s nauchnoj molodezhnoj shkoloj imeni I. N. Spiridonova* [Physics and radio electronics in medicine and ecology. Proceedings of the XIII International Scientific Conference with the Scientific Youth School named after I. N. Spiridonova]. Moscow, Grafika Publ., 2018, pp. 334-336. (In Russ.)

16. Bykov A. V., Korenevskaya S. N., Parhomenko S. A. [Decision support system for managing patients with chronic occlusive disease of the arteries of the lower extremities aggravated by ischemic pathology]. *Mediko-ekologicheskie informacionnye tekhnologii – 2018. Sbornik nauchnyh statej po materialam XXI Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Medico-ecological information technologies – 2018. Collection of scientific articles based on materials of the XXI International scientific and technical conference]; ed. by N. A. Korenevskij. Kursk, Southwest State University Publ., 2018, pp. 69-77. (In Russ.)

17. Bykov A. V., Korenevskaya S. N., Parhomenko S. A., Starodubceva L. V., Hripina I. I. *Prognozirovanie pojavleniya i razvitiya gangreny nizhnih konechnostej s ispol'zovaniem nechetkih intellektual'nyh tekhnologij* [Forecasting the appearance and development of gangrene of the lower extremities using fuzzy intelligent technologies]. Kursk, Izdatel'skij dom VIP Publ., 2017. 470 p.

18. Bykov A. V., Korenevskaya S. N., Rodionov D. S. [Using hybrid fuzzy models to assess the severity of combined ischemic pathologies]. *Biotekhnicheskie, medicinskie, ekologicheskie sistemy i robototekhnicheskie komplekсы – Biomedсистемы-2017. Sbornik trudov XXX Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov, molodyh uchenyh i specialistov* [Biotechnical, medical, ecological systems and robotic complexes – Biomedsystems-2017. Proceedings of the XXX All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Young Scientists and Specialists]. Ryazan, Ryazan State Radio Engineering University Publ., 2017, pp. 297-300. (In Russ.)

19. Bykov A. V., Korenevskij N. A., Bojцова E. A., Goryajnov R. Yu. *Ocenka intensivnosti boleвого sindroma pri ishemii serdca* [Evaluation of the intensity of pain syndrome in cardiac ischemia]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2017, vol. 16, no. 4, pp. 848-856.

20. Bykov A. V., Korenevskij N. A., Rodionova S. N., Cymbal E. V. *Metod i nechetkaya model' ocenki dinamiki razvitiya kriticheskoj ishemii nizhnih konechnostej* [Method and fuzzy model for assessing the dynamics of development of critical ischemia of the lower extremities]. *Vestnik novyh medicinskih tekhnologij = Bulletin of New Medical Technologies*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 251-257.

21. Bykov A. V., Korenevskij N. A., Parhomenko S. A., Rodionova S. N., Cymbal E. V. *Vybor skhem lechebno-ozdorovitel'nyh meropriyatij dlya bol'nyh hronicheskimi*

obliteriruyushchimi zabolevaniyami arterij nizhnih konechnostej s uchetom sistemnyh vzaimosvyazej central'noj i regional'noj gemodinamiki [The choice of schemes of medical and recreational activities for patients with chronic obliterating diseases of the arteries of the lower extremities, taking into account systemic relationships of central and regional hemodynamics]. *Vestnik novyh medicinskih tekhnologij. Elektronnoe izdanie = Bulletin of New Medical Technologies. Electronic Edition*, 2018, no. 6, pp. 105-114.

22. Вукон А. В., Короневский Н. А. Способ прогнозирования степени тяжести ишемического процесса сердца, головного мозга и нижних конечностей на основании оценки центральной и регионарной гемодинамики органов [A method for predicting the severity of the ischemic process of the heart, brain and lower extremities based on the assessment of central and regional hemodynamics of organs]. Patent RF, no. 2691932, 2017.

Информация об авторах / Information about the Authors

Корогодина Софья Владимировна, студент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Sofya V. Korogodina, Student of the Department of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Полякова Ангелина Вячеславовна, студент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Angelina V. Polyakova, Student of the Department of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Азарова Полина Сергеевна, студент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Polina S. Azarova, Student of the Department of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Винников Артем Викторович, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Artem V. Vinnikov, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Быков Александр Владимирович, кандидат медицинских наук, доцент кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Alexander V. Bykov, Cand. of Sci. (Medical), Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Корневский Николай Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Nikolai A. Korenevsky, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Для цитирования: Белозеров В. А., Корневский Н. А., Коржук Н. Л. Диагностика патологии внепеченочных желчных протоков по данным эндоскопической ультрасонографии с использованием нечетких математических моделей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 2. С. 149–164. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-149-164>.

Поступила в редакцию 17.04.2022

Подписана в печать 12.05.2022

Опубликована 27.06.2022

Diagnosis the Pathology of Extrahepatic Bile Ducts According to Endoscopic Ultrasonography Using Fuzzy Mathematical Models

Vladimir A. Belozеров¹ ✉, Nikolay A. Korenevsky², Nikolay L. Korzhuk³

¹ Endoscopy Department of the Kursk Regional Clinical Hospital
45a Sumskaya Str., Kursk 305007, Russian Federation

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

³ Tula State University
92 Lenin Ave., Tula 300012, Russian Federation

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Abstract

The purpose of research is to improving the quality of diagnosis of obstructive pathology of extrahepatic bile ducts based on the analysis of reference schemes of reference endosonograms through the use of hybrid fuzzy mathematical models.

Methods. The main diagnostic method is endoscopic ultrasonography in combination with the methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules developed at Southwestern State University.

Results. The number of patients with cancer of the extrahepatic bile ducts and the papilla duodeni major is steadily growing and has increased 1,5-2 times over the past 20 years. The differential diagnosis of benign and malignant stenoses is particularly difficult due to the similarity of their echosemiotics.

Based on expert assessments of endosonograms displaying the pathology of extrahepatic bile ducts using the methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules, a fuzzy hybrid model of differential diagnosis of the pathology under study was obtained. Based on the results of mathematical modeling and statistical tests on representative control samples, it was shown that the obtained model of differential diagnosis using reference images of reference endosonograms provides confidence in the desired diagnosis at the level of 0,93.

Conclusions. The obtained model of differential diagnosis of obstructive pathology of extrahepatic bile ducts provides confidence in decision-making at the level of 0,93, which is an acceptable quality indicator in clinical practice, providing "work" in conditions of insufficient statistics with a poorly formalized data structure.

Keywords: mathematical model; differential diagnosis; obstructive pathology of extrahepatic bile ducts; reference scheme of the reference endosonogram; fuzzy decision rules.

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

For citation: Belozеров V. A., Korenevsky N. A., Korzhuk N. L. Diagnosis the Pathology of Extrahepatic Bile Ducts According to Endoscopic Ultrasonography Using Fuzzy Mathematical Models. *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*. 2022; 12(2): 149–164. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2022-12-2-149-164>.

Received 17.04.2022

Accepted 12.05.2022

Published 29.06.2022

Введение

Среди заболеваний органов панкреатобилиарной зоны особую актуальность приобретает патология, осложняющаяся синдромом механической желтухи, который относится к частой хирургической патологии [1]. До 80% этиологических факторов холестаза занимают доброкачественные заболевания, развивающиеся на фоне желчнокаменной болезни, которой подвержены до 30% населения в возрастной группе старше 70 лет. В 20% случаев обструкция желчных протоков вызвана ростом опухолей [2]. Злокачественные новообразования панкреатобилиарной зоны составляют до 15% всех опухолей желудочно-кишечного тракта, на этом фоне отмечается рост числа пациентов с обструкцией внепеченочных желчных протоков¹. Желчные протоки являются связующим звеном органов панкреатобилиарной зоны, их детальная визуализация является неотъемлемым условием дифференциальной диагностики патологии

указанной локализации, но это не всегда является простой задачей [3]. Высокоинформативным методом диагностики патологии внепеченочных желчных протоков (ВЖП) является эндоскопическая ультрасонография (ЭУС). Вместе с тем ЭУС – это сложный в освоении и операторозависимый метод, достоверность результатов которого напрямую зависит от опыта исследователя [4]. Описанная в литературе эхоэмиотика патологии ВЖП не систематизирована и нуждается в уточнении. Немногие авторы объективизируют результаты ЭУС с применением методов математической статистики². Информационные и интеллектуальные технологии являются одним из способов объективизации и повышения точности анализа медицинских изображений, включая эндосонограммы. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), разработанная в Юго-Западном государственном университете, координирует и комбинирует клиническое мышление вра-

¹ Фомичева Н. В. Холангиоскопия и конфокальная лазерная эндомикроскопия в диагностике заболеваний внепеченочных желчных протоков: дис. ... канд. мед. наук. М., 2018. 140 с.

² Солодина Е. Н. Эндоскопическое ультразвуковое исследование в диагностике хирургических заболеваний органов панкреатобилиарной зоны: дис. ... д-ра мед. наук. М., 2016. 316 с.

чей с интеллектом когнитолога и элементами искусственного интеллекта [5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14]. Интеллект клиницистов компенсирует недостаток статистики и позволяет в симбиозе с инженером когнитологом строить формальные модели на основе плохоформализуемых данных. Инженер-когнитолог проводит разведочный анализ, подбирает математические модели, соответствующие структуре решаемых задач. Рациональная комбинация интеллектуальных составляющих обеспечивается соответствующим алгоритмом МСГНРП [5; 7; 9]. Такой симбиоз предоставляет возможность создания качественно новых информационных систем, позволяющих решать широкий круг задач интерпретации изображений, полученных различными методами диагностики, обеспечивая адекватность принимаемых решений в условиях неопределенности исходных данных [9].

Применительно к дифференциальной диагностике патологии ВЖП клиническое мышление врачей используется для анализа плохоструктурированных изображений эзонограмм, при этом обеспечивается выбор в зоне интереса информативных областей, характерных для диагностируемой патологии. При этом на процесс формирования и распознавания патологии воздействуют факторы, часто не доступные искусственному интеллекту. Это и опыт клинициста, и интуиция, коллективный разум, и другие, возможно, малоизученные особенности мышления.

Задачи исследования – с целью повышения качества дифференциальной диагностики патологии ВЖП и объективизации результатов эндосонографии сформулировать эхографические критерии дифференциальной диагностики опухолевой и неопухолевой обструкции ВЖП. Для количественной оценки эндосонограмм сформировать реперные схемы из эталонных эндосонограмм типовой узнаваемой эхоструктуры, которые бы могли проанализировать и оценить эксперты и присвоить им соответствующие коэффициенты уверенности дифференциации патологии по соответствующим классам с применением разработанных продукционных нечетких решающих правил. Также в задачи исследования входит контроль срабатывания решающих правил на основе анализа группы пациентов с морфологически подтвержденными диагнозами.

Материалы и методы

В отделении эндоскопии Курской областной многопрофильной клинической больницы по поводу обструктивной патологии ВЖП эндосонографию выполнили 173 пациентам. В исследование вошли больные с клинико-лабораторными признаками обструкции желчных протоков, которым выполнена ЭУС и у которых при первичном обследовании не выявлено патологических образований поджелудочной железы. Из исследования исключены пациенты, причиной обструкции у которых явилась патология, локализуемая вне желчных

протоков. Кроме того, из исследования исключены пациенты, у которых отсутствовала морфологическая верификация патологии либо исход заболевания был не известен при условии их наблюдения не менее двух лет. Ограничениями к выполнению ЭУС явились ранее выполненные резекционные вмешательства, или патология, препятствующая проведению аппарата в ДПК. Опухоли дистальной части общего желчного протока (ОЖП) выявлены у 24 (13,9%) пациентов, среди них женщин было 13 (54,2%), мужчин – 11 (45,8%), средний возраст составил $(66 \pm 5,7)$ лет. Доброкачественная обструкция желчных протоков диагностирована в 149 (86,1%) случаях. В большинстве случаев выявлен холедохолитиаз – 97 (65,1%) больных. Стриктуры ОЖП различного генеза диагностированы у 43 пациентов, что составило 28,1%. Экстрахоледохеальная компрессия, локализуемая дистальнее пузырного протока в основном увеличенными лимфатическими узлами, обнаружена в 9 (6,1%) случаях. Среди всех пациентов с доброкачественной патологией внепеченочных желчных протоков периампулярной локализации преобладали женщины – 102 (68,5%) человека. Средний возраст этих пациентов составил $(59 \pm 6,4)$ лет. Видеозаписи всех исследований архивировались на электронных носителях.

При выполнении ЭУС в фокусе внимания была дифференциация доброка-

чественных стриктур и стриктур опухолевой этиологии. К критериям, идентифицирующим злокачественное поражение желчных протоков, относим: неоднородное гипоэхогенное образование в просвете протока и за его пределами с неровными, нечеткими контурами, неправильная форма образования, связь образования со стенкой протока, гипоэхогенная инфильтрация окружающих тканей, отсутствие структурности стенки протока на этом уровне, неровность наружного контура протока, «обрыв протока» либо резкое его сужение с утолщением стенок в этой области, ассиметричное утолщение стенок протока, сужение просвета протока без изменения или с увеличением его общего диаметра, протяженность сужения более 1 см, симптом двух протоков, лимфаденопатия с признаками злокачественности, признаки инвазии сосудистых структур.

В рамках исследования мы пришли к выводу, что систематизацию эхографических критериев патологии ВЖП оптимальнее представить в виде реперных схем эталонных сонограмм эхографической структуры, которые наиболее полно отражают характеристики объекта, включая все его эхопризнаки, что позволит максимально точно ориентировать пользователя в правильном принятии решений и идентифицировать искомым объект в массе анатомических структур. Используя совокупность реперных схем эталонных эндосонограмм,

нами сформирована шкала, где изображения расположены в порядке изменения характера обструктивной патологии от доброкачественной до злокачественной. Совместный анализ наблюдаемых картин врачами и специалистами по обработке изображений [15] позволил прийти к заключению о целесообразности синтеза моделей дифференциальной диагностики по двум вариантам реперных схем – с продольным изображением структуры патологического образования и с поперечным изображением. Такое представление патологии связано с тем,

что структура анализируемых изображений, в отличие от текстурных картинок, практически всегда имеет неправильную форму и отличается при продольном и поперечном сканировании.

На рисунках 1–6 приведены изображения выделенных реперных схем эталонных эндосонограмм, описывающих норму и основную патологию ВЖП.

Репер 1. Схема структуры нормального ОЖП (рис. 1).

Репер 2. Схема структуры ОЖП при холедохолитиазе (рис. 2).



Рис. 1. Реперная схема структуры нормального желчного протока; а – продольное изображение; б – поперечное изображение

Fig. 1. Reference diagram of the structure of the normal bile duct; а – longitudinal image, б – transverse image



Рис. 2. Реперная схема структуры ОЖП при холедохолитиазе; а – продольное изображение; б – поперечное изображение

Fig. 2. Reference diagram of the structure of the common bile duct in cholelithiasis; а – longitudinal image; б – transverse image

Репер 3. Схема структуры ОЖП, содержащего «рыхлый» конкремент (рис. 3).

Репер 4. Схема структуры ОЖП при доброкачественной рубцово-воспалительной стриктуре (рис. 4).

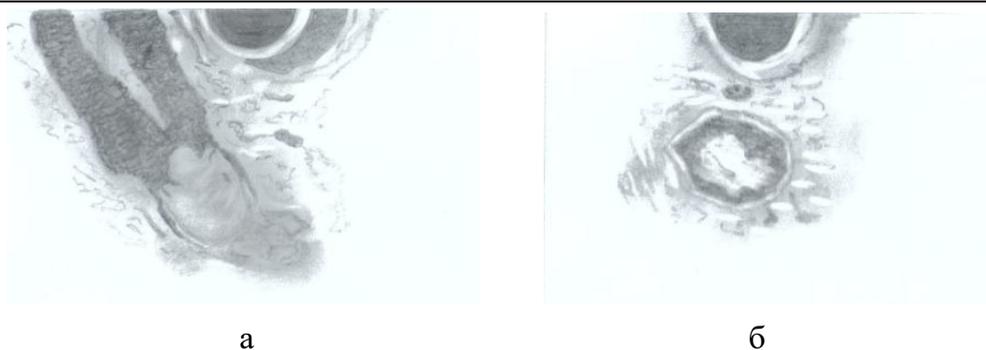


Рис. 3. Реперная схема структуры ОЖП, содержащего «рыхлый» конкремент

Fig. 3. Reference diagram of the structure of the common bile duct containing a "loose" stone; a – longitudinal image; б – transverse image

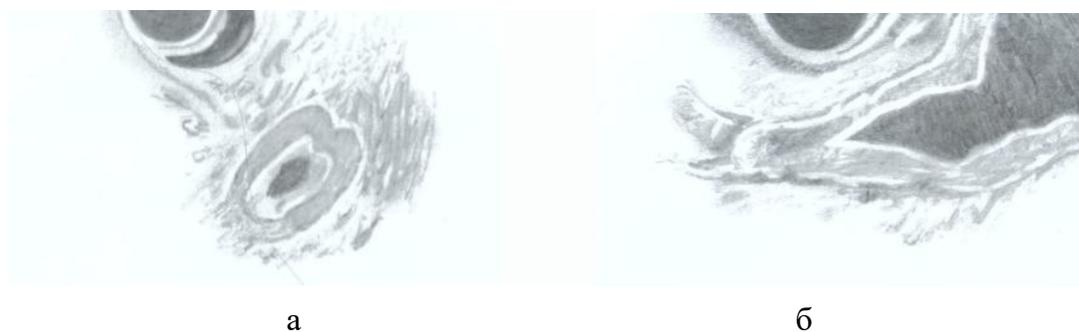


Рис. 4. Реперная схема структуры ОЖП при доброкачественной рубцово-воспалительной стриктуре: а – продольное изображение; б – поперечное изображение

Fig. 4. Reference diagram of the structure of the common bile duct in benign cicatricial-inflammatory stricture: a – longitudinal image; б – transverse image

Репер 5. Схема структуры ОЖП при холангиокарциноме (рис. 5).

Репер 6. Схема структуры ОЖП при холангиокарциноме с инвазией в окружающие структуры (рис. 6).

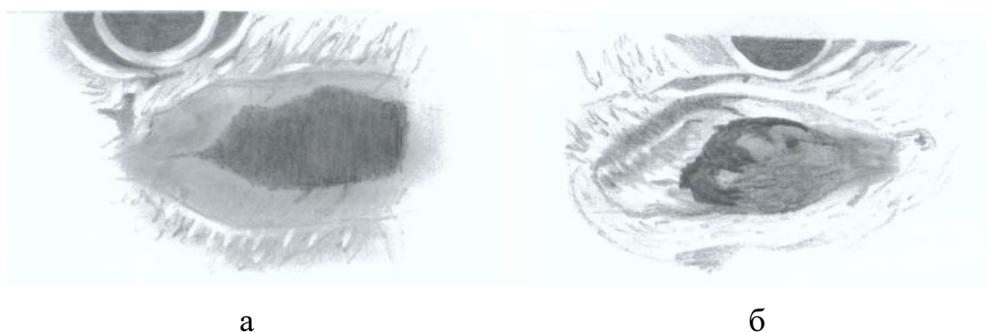


Рис. 5. Реперная схема структуры ОЖП при холангиокарциноме: а – продольное изображение; б – поперечное изображение

Fig. 5. Reference diagram of the structure of the common bile duct in cholangiocarcinoma: a – longitudinal image; б – transverse image

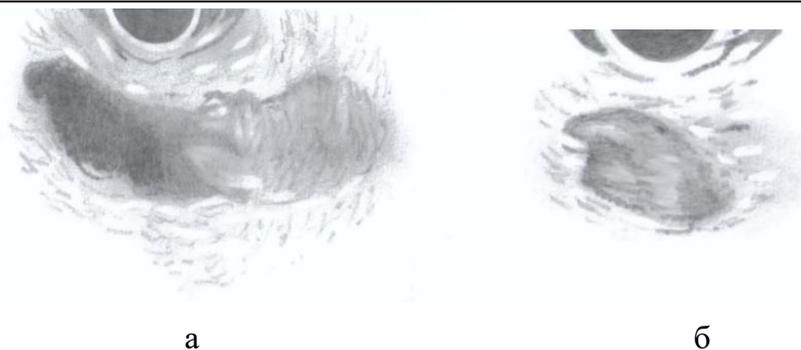


Рис. 6. Реперная схема структуры ОЖП при холангиокарциноме с инвазией в окружающие структуры: а – продольное изображение; б – поперечное изображение

Fig. 6. Reference diagram of the structure of the common bile duct in cholangiocarcinoma with invasion into the surrounding structures: a – longitudinal image; б – transverse image

По рекомендациям МСГНРП для синтеза решающих правил дифференциальной диагностики периампулярной обструкции инженер-когнитолог совместно со специалистами ультразвуковой диагностики формирует группу экспертов, компетентных в области патологии панкреатобилиарной зоны. Эксперты знакомятся с основными принципами МСГНРП. Количественный и качественный состав экспертной группы определен квалиметрией и корректируется с учетом коэффициента конкордации [8; 11; 16; 17]. Количественный со

став с учетом особенностей решаемой задачи определен в составе 8 специалистов. Эксперты определяли коэффициенты уверенности в отнесении пациентов к одному из классов состояний по шести разработанным реперным схемам (С1...С6). Технология Дельфи позволила экспертам построить нечеткие решающие таблицы (табл. 1 и табл. 2), элементами которых являются коэффициенты уверенности K_{ci} в отнесении пациентов к одному из исследуемых классов состояний. Результаты работы экспертов приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Результаты опроса экспертов по классу ω_p «злокачественная обструкция ОЖП»

Table 1. Results of a survey of experts on the class of "malignant obstruction of the common bile duct"

Эталон	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Э1	0	0	0,15	0,45	0,70	0,95
Э2	0	0	0,18	0,50	0,70	0,95
Э3	0	0	0,20	0,45	0,65	0,90
Э4	0	0	0,15	0,48	0,62	0,92
Э5	0	0	0,10	0,45	0,60	0,90
Э6	0	0	0,15	0,50	0,72	0,92
Э7	0	0	0,18	0,98	0,60	0,85
Э8	0	0	0,10	0,48	0,65	0,95
Среднее	0	0	0,15	0,46	0,65	0,92

Примечание. C_i – слайд с номером i ; $Э_j$ – эксперт с номером j .

Таблица 2. Результаты опроса экспертов по классу ω_d «доброкачественная обструкция ОЖП»**Table 2.** The results of a survey of experts on the class of "benign structure of common bile duct"

Эталон	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Э1	0	0,98	0,80	0,58	0,20	0
Э2	0	0,98	0,18	0,60	0,20	0
Э3	0	0,99	0,20	0,48	0,15	0
Э4	0	0,96	0,15	0,55	0,10	0
Э5	0	0,98	0,10	0,50	0,10	0
Э6	0	0,98	0,15	0,55	0,12	0
Э7	0	0,96	0,18	0,62	0,15	0
Э8	0	0,98	0,10	0,60	0,18	0
Среднее	0	0,98	0,15	0,56	0,15	0

Усредненные коэффициенты уверенности K_{ci} по существу можно использовать как основу для диагностического алгоритма, в соответствии с которым специалист ультразвуковой диагностики, наблюдая реальную эндосонограмму, выбирает ближайшую к ней реперную схему структуры ОЖП и по таблицам выбирает пару соответствующих усредненных коэффициентов уверенности. Решение принимается в пользу класса с большим коэффициентом уверенности при условии превышения им принятого экспертами порога [18; 19; 20].

Совместный анализ типовых эндосонограмм и усредненных коэффициентов уверенности позволил сделать вывод о том, что специалисты достаточно уверенно сопоставляют и оценивают сходства наблюдаемых ими реальных сонограмм и реперных схем. Это создает предпосылки значительного увеличения точности в принимаемых решениях путем перехода от шкалы порядка к более

мощной шкале интервалов с отображением на ней меры близости между типовыми эхоструктурами ОЖП. Такая шкала S позволяет судить о том, насколько близко располагается объект наблюдений со «своей картинкой» к исследуемым классам состояний по построенным на ней функциям принадлежности к классам ω_r и ω_d с базовой переменной S . В такой интерпретации величины функций принадлежности трактуются как величины уверенностей в исследуемых классах состояний.

В ходе проведенных исследований, с учетом мнений высококвалифицированных экспертов и структуры данных решаемой задачи шкала интервалов S была построена по следующим правилам. Номерам типовых эхографических текстур были поставлены в соответствие целые числа от 1 до 6 с учетом того, что с ростом этих чисел увеличивается уверенность в принимаемых решениях по

классу ω_p . В качестве единицы измерений выбран отрезок шкалы величиной 0,1. По методу Делфи экспертами на ин-

тервальной шкале S отображены графики функций принадлежности к классам ω_p и ω_d (рис. 7).

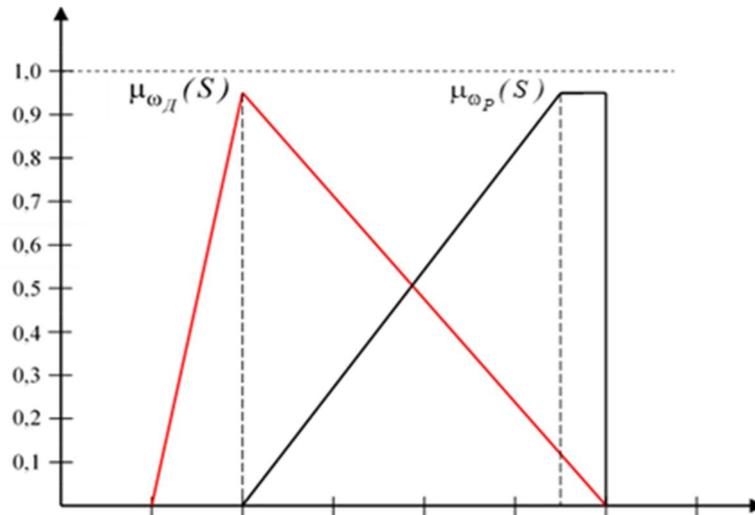


Рис. 7. Графики функций принадлежности к классам ω_p «злокачественная обструкция ОЖП» и ω_d «доброкачественная обструкция ОЖП»

Fig. 7. Graphs of the functions of belonging to the classes ω_p "malignant obstruction of the common bile duct" and ω_d "benign obstruction"

Аналитически графики описываются следующими выражениями:

$$\mu_{\omega_d}(S) = \begin{cases} 0, & \text{если } S \leq 1, \\ 0,98S - 0,98, & \text{если } 1 < S \leq 2, \\ -0,245S + 1,47, & \text{если } 2 < S \leq 6; \end{cases}$$

$$\mu_{\omega_p}(S) = \begin{cases} 0, & \text{если } S \leq 2, \\ 0,242S - 0,484, & \text{если } 2 < S \leq 5,8, \\ 0,92, & \text{если } 5,8 < S \leq 6. \end{cases}$$

Частные уверенности U_{ω_i} в исследуемых классах состояний $I=D, P$ определяется соответствующими функциями принадлежности:

$$U_{\omega_d} = \mu_{\omega_d}(S), \quad (1)$$

$$U_{\omega_p} = \mu_{\omega_p}(S). \quad (2)$$

Логика работы этих решающих правил заключается в том, что по выбран-

ной сонограмме с точностью 0,1 определяется значение S с расчетом соответствующих значений функций принадлежности, которые определяют уверенности по исследуемым классам состояний.

Решение о характере дифференцируемой патологии принимается по максимальному значению U_{ω_i} .

В ходе математического моделирования и экспертного оценивания было показано, что уверенность в принимаемых решениях с использованием нечетких моделей (1) и (2) превышает величину 0,9, что является хорошим практическим результатом для рассматриваемого класса задач.

Диагностическую эффективность, отражающую точность работы решающих правил, определяли для класса ω_p , поскольку группа заболеваний, составляющая этот класс, наиболее однородна, а также своевременная диагностика патологии, входящей в этот класс, наиболее актуальна и кардинально влияет на результаты лечения. Для проверки точности классификации сформировали контрольную группу из 22 человек для

класса ω_p . Дополнительно к этому классу был сформирован альтернативный класс, включающий пациентов без патологии периампулярной области в составе 62 человек. Контроль работы решающего правила (2) определялся по количеству ошибок, совершаемых этим правилом по отношению к альтернативному классу. Результаты контрольных испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты срабатывания решающих правил

Table 3. Results of triggering the decisive rules

Пациенты		Результаты наблюдения	
		положительные	отрицательные
ω_p	$N_p = 22$	19	3
	$N_{ap} = 62$	3	59

По результатам срабатывания решающих правил определялись такие показатели качества классификации, принятые в теории распознавания образов, как диагностическая специфичность, диагностическая чувствительность и диагностическая эффективность.

Согласно таблице 3, показатель чувствительности, характеризующий качество диагностики решающего правила (2) для класса ω_p , равен 0,86. Показатель специфичности, характеризующий качество решающего правила (2) для класса ω_p , равен 0,95, соответственно показатель диагностической эффективности – 0,93. Приведенные расчеты подтверждают результаты математического моделирования и экспертного оценивания.

Выводы

Разработка эхопризнаков обструктивной патологии ВЖП на основе анализа эхографической структуры по данным ЭУС с использованием разработанных гибридных нечетких решающих правил позволяет объективизировать данные эндосонографии и улучшить результаты неинвазивной диагностики. Для повышения информативности нечеткой математической модели в решающих правилах необходимо учитывать характеристики не только патологических образований, но отношение их к магистральным сосудам, а также состояние лимфатических узлов.

Список литературы

1. Актуальные проблемы механической желтухи в хирургии / С. Н. Стяжкина, А. Р. Истеева, К. А. Короткова, Д. Р. Сахабутдинова, Г. Ф. Хасанова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 7-3. С. 427-430.
2. Подолужный В. И. Механическая желтуха: принципы диагностики и современного хирургического лечения // Фундаментальная и клиническая медицина. 2018. Т. 3, № 2. С. 82-92.
3. Endosonography for suspected obstructive jaundice with no definite pathology on ultrasonography / С. Н. Chen, С. С. Yang, Y. Н. Yeh, T. Yang, T. С. Chung // J. Formos. Med. Assoc. 2015. N 114(9). P. 820-8. <https://doi.org/10.1016/j.jfma.2013.09.005>.
4. Hawes R. H., Fockens P. Endosonography. Elsevier Inc., 2006. 329 p.
5. Количественная оценка ультразвукового изображения / И. В. Ключкин, А. Ю. Кинзерский, М. А. Кинзерская, Д. В. Пасынков // Казанский медицинский журнал. 2005. Т. 86, № 3. С. 237-240.
6. Корневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1. С. 33-35.
7. 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. Т. 1, № (2). С. 99-103.
8. 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.
9. Прогнозирование и диагностика заболеваний, вызываемых вредными производственными и экологическими факторами на основе гетерогенных моделей / Н. А. Корневский, Н. А. Серебровский, В. И. Коптева, Н. А. Говорухина. Курск: Изд-во Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2012. 231 с.
10. Корневский Н. А. Проектирование нечетких решающих сетей, настраиваемых по структуре данных для задач медицинской диагностики // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2005. Т. 4, № 1. С. 12-20.
11. Корневский Н. А., Разумова К. В. Синтез коллективов гибридных нечетких моделей оценки состояния сложных систем // Научные технологии. 2014. Т. 12 (15). С. 31-39.
12. Информационные технологии в медицине: монография / А. А. Хадарцев [и др.]. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. 272 с.

13. Хайкин С. Нейронные сети: Полный курс. 2-е изд., испр. М.: ИД Вильямс, 2006. 1104 с.
14. Роль эндоскопии и эндоУЗИ в диагностике рака поджелудочной железы / К. В. Шишин, Е. В. Быстровская, И. Ю. Недолужко, Д. Д. Коваленко [и др.] // *Анналы хирургической гепатологии*. 2019. Т. 24, № 3. С. 36-43.
15. Томакова Р. А., Филист С. А., Насер А. А. Нечеткие нейросетевые технологии для выделения сегментов с патологическими образованиями и морфологическими структурами на медицинских изображениях // *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2012. № 4. С. 43-50.
16. Фомин В. М. Квалиметрия. Управление качеством. Сертификация. М.: ОСЬ-89, 2002. 384 с.
17. 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.
18. Корневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // *Медицинская техника*. 2015. № 1. С. 33-35.
19. Корневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.
20. Метод синтеза нечетких решающих правил на основе моделей системных взаимосвязей для решения задач прогнозирования и диагностики заболеваний / Н. А. Корневский, М. В. Артеменко, В. Я. Провоторов, Л. А. Новикова // *Системный анализ и управление в биомедицинских системах*. 2014. Т. 13, № 4. С. 881-886.

References

1. Styazhkina S. N., Isteeva A. R., Korotkova K. A., Sahabutdinova D. R., Hasanova G. F. Aktual'nye problemy mekhanicheskoy zheltuhi v hirurgii [Actual problems of mechanical jaundice in surgery]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij = International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2016, no. 7-3, pp. 427-430.
2. Podoluzhnyj V. I. Mekhanicheskaya zheltuha: principy diagnostiki i sovremennogo hirurgicheskogo lecheniya [Mechanical jaundice: principles of diagnosis and modern surgical treatment]. *Fundamental'naya i klinicheskaya medicina = Fundamental and Clinical Medicine*. 2018, vol. 3, no. 2, pp. 82-92.
3. Chen C. H., Yang C. C., Yeh Y. H., Yang T., Chung T. C. Endosonography for suspected obstructive jaundice with no definite pathology on ultrasonography. *J. Formos. Med. Assoc.*, 2015, no. 114(9), pp. 820-8. <https://doi.org/10.1016/j.jfma.2013.09.005>

4. Hawes R. H., Fockens P. Endosonography. Elsevier Inc., 2006. 329 p.
5. Klyushkin I. V., Kinzerskij A. Yu., Kinzerskaya M. A., Pasyukov D. V. Kolichestvennaya ocenka ul'trazvukoovogo izobrazheniya [Quantitative evaluation of the ultrasound image]. *Kazanskij medicinskij zhurnal = Kazan Medical Journal*, 2005, vol. 86, no. 3, pp. 237-240.
6. Korenevskij N. A. Ispol'zovanie nechetkoj logiki prinyatiya reshenij dlya medicinskih ekspertnyh sistem [Using fuzzy decision logic for medical expert systems]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2015, no. 1, pp. 33-35.
7. Korenevsky N. A. Method of synthesis of heterogeneous fuzzy rules for analysis and control of the state of biotechnical systems [Method of synthesis of heterogeneous fuzzy rules for analysis and control of the state of biotechnical systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Series: management, computer engineering, computer science. Medical instrumentation = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation*, 2013, vol. 1, no. 2, pp. 99-103.
8. Korenevskij N. A., Rodionova S. N., Hripina I. I. Metodologiya sinteza gibridnyh nechetkih reshayushchih pravil dlya medicinskih intellektual'nyh sistem podderzhki prinyatiya reshenij [Methodology for synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems]. Stary Oskol, TNT Publ., 2019. 472 p.
9. Korenevskij N. A., Serebrovskij N. A., Kopteva V. I., Govoruhina T. N. Prognozirovaniye i diagnostika zabolevanij, vyzyvayemyh vrednymi proizvodstvennymi i ekologicheskimi faktorami na osnove geterogennyh modelej [Prediction and diagnosis of diseases caused by harmful industrial and environmental factors based on heterogeneous models]. Kursk, Publishing House of Kursk State Agricultural Academy, 2012. 231 p.
10. Korenevskij N. A. Proektirovaniye nechetkih reshayushchih setej, nastraivaemyh po strukture dannyh dlya zadach medicinskoj diagnostiki [Design of fuzzy decision networks, configurable by data structure for medical diagnostics tasks]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = Systems Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2005, vol. 4, no. 1, pp. 12-20.
11. Korenevskij N. A., Razumova K. V. Sintez kollektivov gibridnyh nechetkih modelej ocenki sostoyaniya slozhnyh sistem [Synthesis of teams of hybrid fuzzy models for assessing the state of complex systems]. *Naukoemkie tekhnologii = High-Tech Technologies*, 2014, vol. 12 (15), pp. 31-39.
12. Hadarcev A. A., eds. Informacionnyye tekhnologii v medicine [Information technologies in medicine]. Tula, Publishing House of the Tula State University, 2006. 272 p.

13. Hajkin S. Nejrornyje seti: Polnyj kurs [Neural Networks: A Complete Course]. 2th ed. Moscow, I. D. Williams Publ., 2006. 1104 p.

14. Shishin K. V., Bystrovskaya E. V., Nedoluzhko I. Yu., Kovalenko D. D., eds. Rol' endoskopii i endo-UZI v diagnostike raka podzheludochnoj zhelezy [The role of endoscopy and endo-ultrasound in the diagnosis of pancreatic cancer]. *Annaly hirurgicheskoy gepatologii = Annals of Surgical Hepatology*, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 36-43.

15. Tomakova R. A., Filist S. A., Nasser A. A. Nechetkie neirosetevye tekhnologii dlya vydeleniya segmentov s patologicheskimi obrazovaniyami i morfologicheskimi strukturami na meditsinskikh izobrazheniyakh [Fuzzy neural network technologies for identifying segments with pathological formations and morphological structures in medical images]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radio Electronics*, 2012, no. 4, pp. 43-50.

16. Fomin V. M. Kvalimetriya. Upravlenie kachestvom. Sertifikaciya: uchebnoe posobie [Qualimetry. The management of quality. Certification: study guide]. Moscow, OS-89 Publ., 2002. 384 p.

17. Korenevskij N. A. Proektirovanie nechetkih reshajushhih setej, nastraivaemyh po strukture dannyh dlja zadach medicinskoj diagnostiki [Design of fuzzy decision networks, configurable by data structure for medical diagnostics tasks]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2005, vol. 4, no. 1, pp. 12-20.

18. Korenevskij N. A. Ispol'zovanie nechetkoj logiki prinjatija reshenij dlja medicinskih jekspertnyh system [Using fuzzy logic of decision-making for medical expert systems]. *Medicinskaja tehnika = Medical Equipment*, 2015, no. 1, pp. 33-35.

19. Korenevskij N. A., Rodionova S. N., Hripina I. I. Metodologija sinteza gibridnyh nechetkih reshajushhih pravil dlja medicinskih intellektual'nyh sistem podderzhki prinjatija reshenij [Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems]. Staryj Oskol, TNT Publ., 2019. 472 p.

20. Korenevskij N. A., Artemenko M. V., Provotorov V. Ja., Novikova L. A. Metod sinteza nechetkih reshajushhih pravil na osnove modelej sistemnyh vzaimosvjazej dlja reshenija zadach prognozirovaniya i diagnostiki zabolevanij [Method of synthesis of fuzzy decision rules based on models of system relationships for solving problems of forecasting and diagnosis of]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2014, vol. 13, no. 4, pp. 881-886.

Информация об авторах / Information about the Authors

Белозеров Владимир Анатольевич, кандидат медицинских наук, врач отделения эндоскопии, Курская областная клиническая больница, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: b9102107495@yandex.ru

Vladimir A. Belozеров, Cand. of Sci. (Medical), Doctor of the Endoscopy Department, Kursk Regional Clinical Hospital, Kursk, Russian Federation, e-mail: b9102107495@yandex.ru

Корневский Николай Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Nikolai A. Korenevsky, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Коржук Николай Львович, кандидат технических наук, профессор кафедры приборов и биотехнических систем, Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация, e-mail: nikolaikorzhuk@mail.ru

Nikolay L. Korzhuk, Cand. of Sci. (Engineering), Professor of the Department Devices and Biotechnical Systems, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: nikolaikorzhuk@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 , \tg и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 dpi и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы.**

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются.**

12. **Список литературы к статье обязателен** и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы (не менее 10). Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26, тел/факс (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала: <https://swsu.ru/izvestiya/seriesivt/>.